

## **Sección 3**

# **Controles de COV**

## **Sección 3.2**

### **Controles de Destrucción de COV**

# Capítulo 1

## Antorchas

Leslie B. Evans

*Organic Chemicals Group*

Grupo de Químicos Orgánicos

William M. Vatauvuk

*Innovative Strategies and Economics Group*

Grupo de Estrategias Inovadoras y Economía

*Office of Air Quality Planning and Standards*

Oficina de Planeación y Normas de la Calidad del Aire

*U.S. Environmental Protection Agency*

Agencia para la Protección Ambiental de los EE. UU.

Research Triangle Park, NC 27711

Diana K. Stone

Susan K. Lynch

Richard F. Pandullo

*Radian Corporation*

Corporación Radian

Research Triangle Park, NC 27709

Walter Koucky

E.H. Pechan and Associates, Inc.

Durham, NC 27707

Septiembre del 2000

# Contenido

1.1	Introducción .....	3
1.1.1	Tipos de Antorchas .....	3
1.1.2	Aplicabilidad .....	5
1.1.3	Funcionamiento .....	6
1.1.3.1	Factores que Afectan la Eficiencia .....	6
1.1.3.2	Especificaciones de las Antorchas .....	7
1.2	Descripción del Proceso .....	9
1.2.1	Tubería de Transporte de Gas .....	9
1.2.2	Cilindro Separador .....	9
1.2.3	Sello de Líquido .....	14
1.2.4	Chimenea de la Antorcha .....	14
1.2.5	Sello de Gas .....	15
1.2.6	Boquilla del Quemador .....	15
1.2.7	Quemadores Pilotos .....	15
1.2.8	Chorros de Vapor .....	16
1.2.9	Controles .....	16
1.3	Procedimientos de Diseño .....	17
1.3.1	Requerimientos de Combustible Auxiliar .....	17
1.3.2	Diámetro de la Boquilla de la Antorcha .....	18
1.3.3	Altura de la Antorcha .....	19
1.3.4	Requerimientos del Gas de Purga .....	21
1.3.5	Requerimientos de Gas Para el Piloto .....	22
1.3.6	Requerimientos de Vapor .....	23
1.3.7	Cilindro Separador .....	24
1.3.8	Sistema Manejador de Gas .....	26
1.4	Estimación de la inversión de capital total .....	27
1.4.1	Costos de Equipo .....	28
1.4.2	Costos de Instalación .....	32
1.5	Estimación de los Costos Totales Anuales .....	33
1.5.1	Costos Directos Anuales .....	33
1.5.2	Costos Indirectos Anuales .....	34
1.6	Problema de Ejemplo .....	36
1.6.1	Información Requerida para el Diseño .....	37
1.6.2	Capital del Equipo .....	37
1.6.2.1	Diseño del Equipo .....	37
1.6.2.2	Costos de Equipo .....	41
1.6.3	Requerimientos de la Operación .....	42
1.6.4	Costos Totales Anuales .....	43
1.7	Reconocimientos .....	45
	Referencias .....	45

## 1.1 Introducción

La combustión por antorcha es un proceso de control de compuestos orgánicos volátiles (COV), en el cual los COVs son canalizado a una ubicación remota, usualmente elevada, y quemados en una flama abierta al aire libre, utilizando una boquilla de quemador especialmente diseñada, un combustible auxiliar y vapor o aire para promover el mezclado para una destrucción de COV casi completa (> 98%). Que tan completa sea la combustión en una antorcha lo gobierna la temperatura de la flama, el tiempo de residencia en la zona de combustión, el mezclado turbulento de los componentes para completar la reacción de oxidación y el oxígeno disponible para la formación de radicales libres. La combustión es completa si todos los COVs se convierten a bióxido de carbono y agua. La combustión incompleta resulta en que parte del COV permanezca inalterado o sea convertido en otros compuestos orgánicos, tales como aldehidos o ácidos.

El proceso de combustión por antorcha puede producir ciertos subproductos indeseables, incluyendo ruido, humo, radiación térmica, luz, óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbón (CO) y una fuente adicional de ignición donde no sea deseable. Sin embargo, con el diseño apropiado, éstos pueden ser minimizados.

### 1.1.1 Tipos de Antorchas

Las antorchas son generalmente categorizadas de dos maneras: (1) por la altura de la punta de la antorcha (v.g. en el suelo o elevada), y (2) por el método de mejoramiento del mezclado en la boquilla de la antorcha (v.g. auxiliado con vapor, auxiliado con aire, auxiliado con presión o no auxiliado). Elevando la flama se pueden prevenir condiciones potencialmente peligrosas a nivel del suelo donde una flama al aire libre (v.g. una fuente de ignición), se localiza cerca de una unidad del proceso. Además, los productos de la combustión pueden dispersarse por encima de las áreas de trabajo para reducir los efectos del ruido, calor, humo y olores desagradables.

En la mayoría de las antorchas, la combustión ocurre por medio de una flama de difusión. Una flama de difusión es aquella en la que el aire se difunde a través de la interfase de las corrientes de combustible/productos de la combustión hacia el centro del flujo del combustible, formando la envolvente de una mezcla de gas combustible alrededor del núcleo de gas combustible. Esta mezcla, por la ignición, establece una zona de flama estable alrededor del núcleo de gas encima de la boquilla del quemador. Este núcleo interno de gas se calienta por difusión de los productos calientes de la combustión de la zona de la flama.

Puede ocurrir desintegración con la formación de pequeñas partículas calientes de carbón que dan a la flama su luminosidad característica. Si hay una deficiencia de oxígeno y las partículas de carbón son enfriadas por debajo de su temperatura de ignición, ocurre ahumamiento. En las flamas de difusión grandes, se pueden formar vórtices de los productos de la combustión alrededor

de partes del gas que se está quemando y apagar el suministro de oxígeno. Ésta inestabilidad localizada causa que la flama vacile, lo que puede ser acompañado por la formación de hollín.

Tal como en todos los procesos de combustión, se requiere un adecuado suministro de aire y un buen mezclado para una combustión completa y minimizar el humo. Los varios diseños de antorcha difieren principalmente en su grado de mezclado.

#### Antorchas auxiliadas con vapor

Las antorchas auxiliadas con vapor son boquillas de quemadores únicas, elevadas a un nivel por encima del suelo por razones de seguridad, que queman el gas venteado esencialmente en una flama de difusión. Se reporta que éstas son la mayoría de las antorchas instaladas y son el tipo de antorchas predominantes en las refinerías y en las plantas de procesos químicos.[1,2]

Para asegurar un adecuado suministro de aire y buen mezclado, éste tipo de sistemas de antorchas inyecta vapor en la zona de combustión para promover la turbulencia para el mezclado e inducir aire en la flama. Las antorchas auxiliadas con vapor son el enfoque del capítulo y serán discutidas en mayor detalle de las Secciones 1.2 a la 1.4.

#### Antorchas auxiliadas con aire

Algunas antorchas usan aire forzado para proporcionar el aire para la combustión y el mezclado requerido para una operación sin humo. Éstas antorchas son contruidas con un quemador en forma de araña (con varios orificios pequeños de gas), localizados por dentro pero cerca de la parte superior de un cilindro de dos pies o más de diámetro. El aire de combustión es proporcionado por un ventilador en el fondo del cilindro. La cantidad de aire de combustión puede ser modificada, variando la velocidad del ventilador. La ventaja principal de las antorchas auxiliadas con aire, es que pueden ser utilizadas donde no esté disponible vapor. Aunque el auxilio con aire generalmente no se utiliza en antorchas grandes (porque generalmente no es económico cuando el volumen de gas es grande[3]), el número de antorchas grandes auxiliadas con aire que son construidas está en aumento.[4]

#### Antorchas no-auxiliadas

La antorcha no auxiliada es solamente una boquilla de quemador sin otra provisión auxiliar para mejorar el proceso de mezclado del aire en la flama. Su uso se limita esencialmente para corrientes de gas que tienen un bajo contenido de calor y una baja relación carbón/hidrógeno que se quema fácilmente sin producir humo.[5] Estas corrientes requieren menos aire para una combustión completa, tienen temperaturas de combustión más bajas que minimizan reacciones de desintegración y son más resistentes a ésta.

## Antorchas auxiliadas con presión

Las antorchas auxiliadas con presión usan la presión de la corriente venteada para promover el mezclado en la boquilla del quemador. Varios proveedores comercializan diseños patentados de boquillas con alta caída de presión. Si se dispone de suficiente presión en la corriente venteada, estas antorchas pueden ser aplicadas a corrientes que anteriormente requerían auxilio con vapor o con aire para una operación sin humo. Las antorchas auxiliadas con presión, generalmente (pero no necesariamente), tienen la instalación del quemador a nivel del suelo, y consecuentemente, deben ser localizadas en un área remota de la planta donde haya suficiente espacio disponible. Tienen múltiples quemadores que van por etapas, para operar en base a la cantidad de gas que está siendo emitido. El tamaño, diseño, número y disposición de los quemadores depende de las características del gas venteado.

## Antorchas cerradas a nivel del suelo

Los quemadores de una antorcha cerrada están dentro de una envoltura que está aislada internamente. Esta envoltura reduce el ruido, la luminosidad y la radiación de calor y proporciona una protección contra el viento. Por lo general, una caída de presión alta en la boquilla es adecuada para proporcionar el mezclado necesario para una operación sin humo y no se requiere el auxilio con vapor o aire. En éste contexto, las antorchas cerradas pueden ser consideradas una clase especial de antorchas auxiliadas con presión o no-auxiliadas. La altura debe ser la adecuada para crear el tiro adecuado para proporcionar suficiente aire para una combustión sin humo y para la dispersión de la pluma térmica. Estas antorchas están siempre a nivel del suelo.

Las antorchas cerradas tienen generalmente menos capacidad que las antorchas abiertas y son utilizadas para la combustión de corrientes venteadas de flujo constante y continuo, aunque se puede obtener una operación eficiente y confiable con una amplio rango de capacidades de diseño. Se puede obtener una combustión estable con gases venteados con contenido de *Btu* más bajos que los que son posibles con diseños de flama abierta ( se han reportado de 50 a 60 *Btu/ft<sup>3</sup>*)[2], probablemente debido a su aislamiento de los efectos del viento. Las antorchas cerradas típicamente se localizan en los rellenos sanitarios.

### **1.1.2 Aplicabilidad**

Las antorchas pueden utilizarse para controlar casi cualquier corriente de COV y pueden manejar fluctuaciones en la concentración de COV, razón de flujo, poder calorífico y contenido de inertes. La combustión por antorcha es apropiada para aplicaciones de corrientes de gas venteadas intermitentes, continuas y variables. La mayoría de las plantas de sustancias químicas y refinerías tienen sistemas actuales de antorcha diseñados para liberar perturbaciones en el proceso en

casos de emergencia que requieren la emisión de grandes volúmenes de gas. Estas antorchas de gran diámetro diseñadas para manejar emisiones de emergencias, también pueden ser utilizadas para controlar corrientes venteadas de operaciones de varios procesos. Para aplicaciones de reconversión, deben considerarse la razón de flujo de la corriente venteada y la presión disponible. Normalmente, los sistemas de antorchas para liberación de emergencia son operados a un pequeño porcentaje de su capacidad y con presión despreciable. Para considerar el efecto de controlar una corriente de venteo adicional, deben evaluarse la velocidad máxima del gas, la presión del sistema y la radiación de calor a nivel del suelo. Aún más, si la presión de la corriente venteada no es suficiente para vencer la presión del sistema de la antorcha, entonces debe evaluarse la factibilidad económica de un manejador de gas. Si la adición de la corriente de venteo causa que se excedan los límites de velocidad máxima o de radiación máxima de calor a nivel del suelo, entonces una aplicación de reconversión no es viable.

Actualmente se operan numerosos sistemas de antorchas en conjunto con sistemas de recuperación de gas. Estos sistemas recuperan y comprimen los COV residuales para usarlos como alimentación en otros procesos o como combustible. Cuando se aplican los sistemas de recuperación de gas, la antorcha se utiliza como capacidad de reserva y para emisiones de emergencia. Dependiendo de la calidad de COV utilizable que puede recuperarse, puede haber una considerable ventaja económica sobre la operación de una antorcha única.

Las corrientes que contienen grandes concentraciones de compuestos halogenados o que contienen azufre, generalmente no se queman por antorcha debido a la corrosión de la boquilla del quemador o a la formación de contaminantes secundarios (tales como el  $\text{SO}_2$ ). Si éste tipo de escapes deben ser controlados por combustión, el método preferible es la incineración térmica, seguida por un lavado para remover los gases ácidos.[3]

### **1.1.3 Funcionamiento**

En esta sección se discuten los parámetros que afectan la eficiencia de destrucción de COV por combustión de antorcha y presenta las especificaciones que deben seguirse cuando las antorchas son utilizadas para cumplir con las normas de emisión de la Agencia para la Protección Ambiental de los EE.UU. (*U.S. Environmental Protection Agency, EPA*).

#### **1.1.3.1 Factores que Afectan la Eficiencia**

Los principales factores que afectan la eficiencia de la combustión por antorcha son la inflamabilidad de los gases venteados, la temperatura de auto ignición, el poder calorífico ( $Btu/ft^3$ ), la densidad y el mezclado en la zona de la flama.

Los límites de inflamabilidad de los gases quemados afectan la estabilidad de la ignición y la extinción de la flama. Los límites de inflamabilidad están definidos como los límites de composición estequiométrica (máximo y mínimo) de una mezcla de combustible-oxígeno que se quemará indefinidamente a condiciones dadas de temperatura y presión sin una fuente de ignición adicional. En otras palabras, los gases deben estar dentro de sus límites de inflamabilidad para arder. Cuando los límites de inflamabilidad son estrechos, el interior de la flama puede tener insuficiente aire para que la mezcla se quemara. Los combustibles, como el hidrógeno, con límites amplios de inflamabilidad son por consecuencia más fáciles de quemar.

Para la mayoría de las corrientes venteadas, el poder calorífico también afecta la estabilidad de la flama, las emisiones y la estructura de la flama. Un valor bajo de poder calorífico produce una flama más fría que no favorece la cinética de la combustión y que también se extingue más fácilmente. La temperatura de flama más baja también reduce las fuerzas flotantes, que reducen el proceso de mezclado.

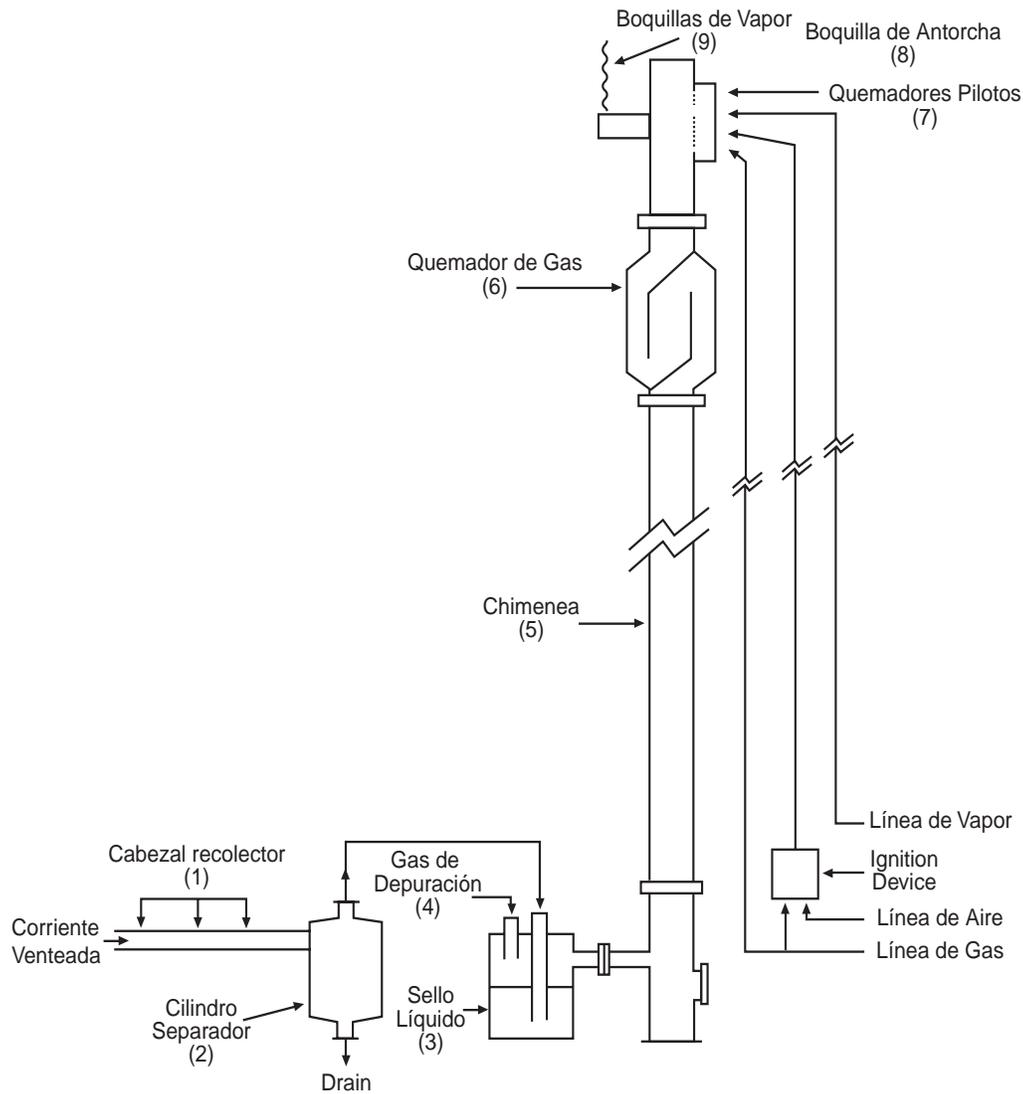
La densidad de la corriente venteada también afecta la estructura y la estabilidad de la flama a través del efecto en la flotabilidad y el mezclado. Por diseño, la velocidad en muchas antorchas es muy baja; por lo tanto, la mayor parte de la estructura de la flama se desarrolla a través de las fuerzas flotantes como resultado de la combustión. Los gases más ligeros, por consiguiente, tienden a quemarse mejor. Además del diseño de boquilla, la densidad también afecta directamente el gas de purga mínimo requerido para prevenir el retorno de la flama, siendo los gases ligeros los que requieren más purga.[5]

El mezclado pobre en la boquilla es la causa principal del humo en la antorcha cuando se quema un material dado. Las corrientes con alta relación molar de carbón a hidrógeno (mayor a 0.35), tienen una mayor tendencia a humear y requieren un mejor mezclado para una combustión sin humo.[3] Por ésta razón una relación genérica de vapor a gas venteado no es necesariamente apropiada para todas las corrientes venteadas. La razón de vapor requerida depende de la relación de carbón a hidrógeno del gas que está siendo quemado. Una alta relación requiere más vapor para prevenir una antorcha humeante.

#### 1.1.3.2 Especificaciones de las Antorchas

A velocidades de salida muy altas, la flama puede separarse de la boquilla y extinguirse, mientras que a velocidades muy bajas, puede arder sobre la boquilla o hacia abajo por los lados de la chimenea.

Los requerimientos de *EPA* para antorchas utilizadas para cumplir con las normas de emisión de *EPA*, se especifican en 40 *CFR* (*Code of Federal Regulations-Código de Reglamentaciones Federales*), Sección 60.18. Estos requerimientos son para antorchas auxiliadas con vapor y no-auxiliadas. Los requerimientos para antorchas elevadas auxiliadas con vapor, establecen que la antorcha debe ser diseñada y operada con:



**Figura 1.1:** Sistema de Antorcha Elevada Auxiliada con Vapor

- una velocidad de salida en la boquilla de la antorcha de menos de 60 *ft/seg* para corrientes de gas de 300 *Btu/ft<sup>3</sup>* y de menos de 400 *ft/seg* para corrientes de gas >1,000 *Btu/ft<sup>3</sup>*. Para corrientes de gas entre 300-1,000 *Btu/ft<sup>3</sup>*, la velocidad máxima permitida ( $V_{max}$ , en *ft/seg*) se determina por la siguiente ecuación:

$$\log_{10}(V_{max}) = \frac{B_v + 1,214}{852} \quad (1.1)$$

donde  $B_v$  es el poder calorífico neto en *Btu/ft<sup>3</sup>*.

- emisiones no visibles. Se permite un período de excepción de cinco minutos durante dos horas consecutivas.
- una flama presente en todo momento cuando las emisiones puedan ser venteadas. La presencia de una flama piloto debe ser monitoreada utilizando un termopar o un dispositivo equivalente.
- que el valor neto del poder calorífico del gas que se quema sea de  $300 \text{ Btu/ft}^3$  ó mayor.

Además, los propietarios o los operadores deben monitorear para asegurarse que las antorchas son operadas y mantenidas de conformidad con su diseño.

## **1.2 Descripción del Proceso**

Los elementos de una antorcha elevada auxiliada por vapor, consisten generalmente de tubería de recolección del gas venteado, servicios (combustible, vapor y aire), tubería desde la base hacia arriba, cilindro separador, sello de líquido, chimenea de la antorcha, sello de gas, boquilla del quemador, quemadores pilotos, chorros de vapor, sistemas de encendido y controles. La Figura 1.1 es un diagrama de un sistema sin humo de antorcha elevada auxiliada con vapor, mostrando los componentes que comúnmente se incluyen.

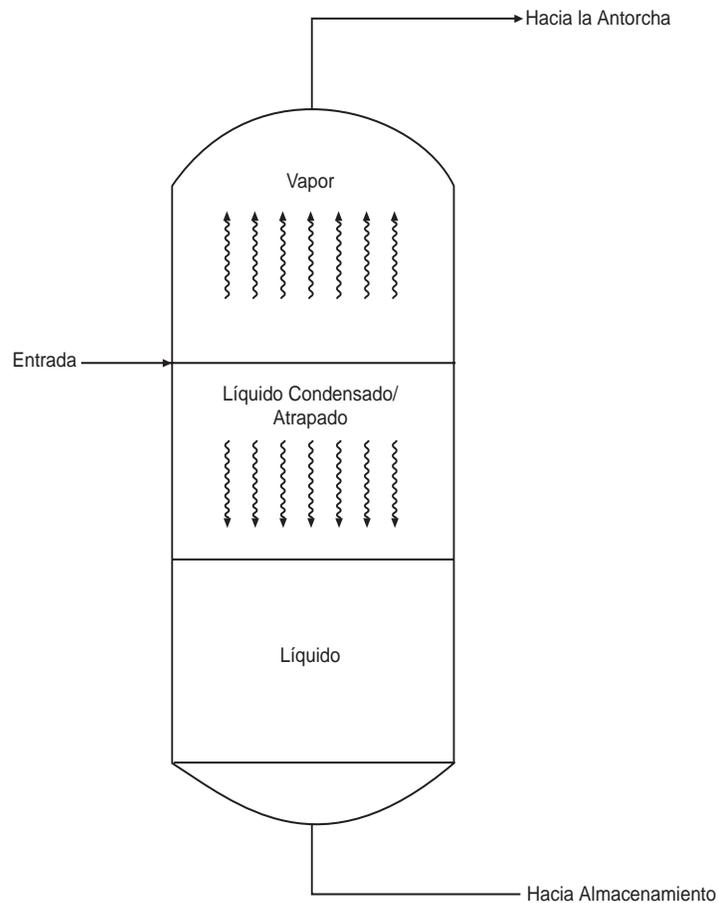
### **1.2.1 Tubería de Transporte de Gas**

Las corrientes de venteo del proceso son enviadas desde el punto de emisión de la instalación hasta la localidad de la antorcha a través del cabezal recolector de gas. La tubería (generalmente acero al carbón cédula 40), se diseña para minimizar la caída de presión. Los conductos no son muy utilizados por ser más propensos a fugas de aire. El número de válvulas debe mantenerse a un mínimo absoluto y deben sellar perfectamente cuando están abiertas. El montaje de la tubería se diseña para evitar cualquier ramal muerto y las trampas de líquido. La tubería está equipada para las purgas, de modo que no ocurran mezclas explosivas en el sistema de la antorcha durante el encendido o durante la operación.

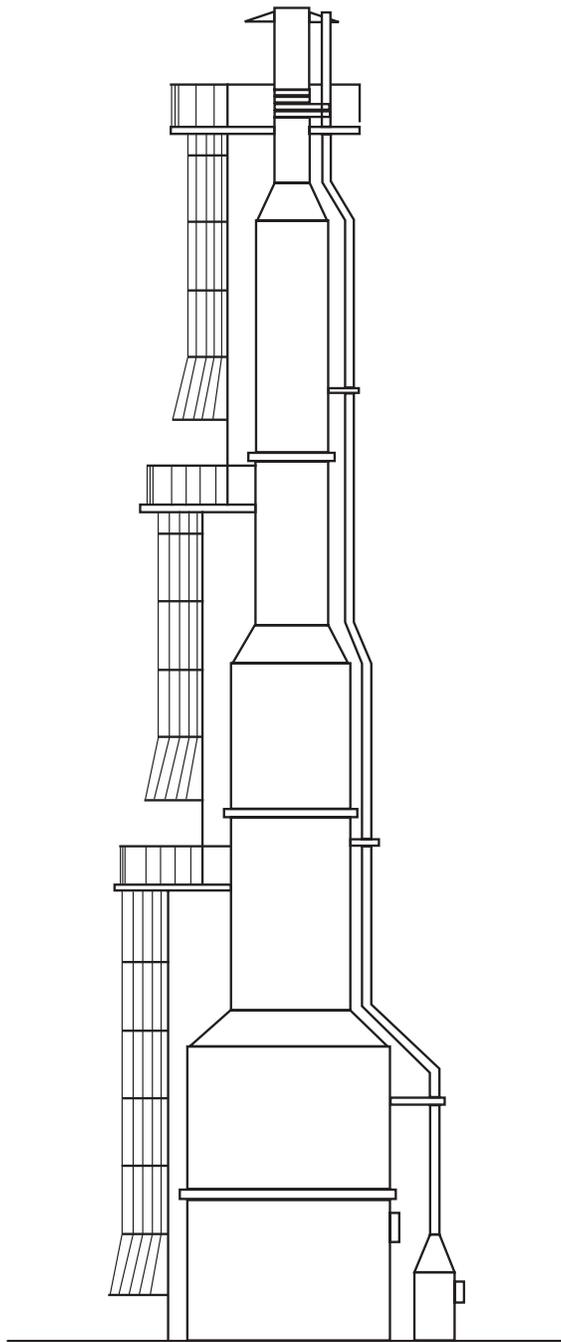
### **1.2.2 Cilindro Separador**

Los líquidos que puedan estar en la corriente del gas venteado o que se puedan condensar en el cabezal recolector y en las líneas de transferencia, son removidas por un cilindro separador (*knock-out drum*). (Véase la Figura 1.2.) El tambor separador o tambor de desarrastre, típicamente es un recipiente horizontal ó vertical localizado en la base de la antorcha o

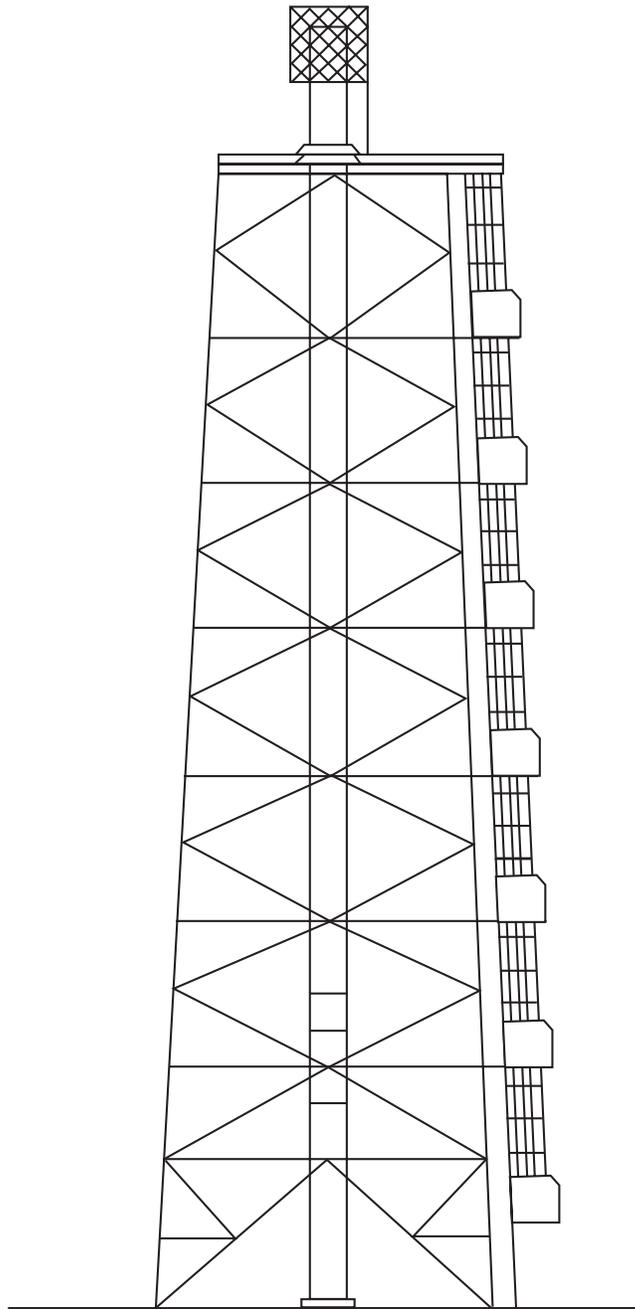
cerca de ella, o un recipiente vertical localizado dentro de la base de la chimenea de la antorcha. El líquido en la corriente venteada puede extinguir la flama o causar una combustión irregular y humo. Además, el quemar líquidos en antorcha puede generar un rocío de sustancias químicas ardiendo calcinantes que puede llegar a nivel del suelo y crear una riesgo de seguridad. Para un sistema de antorcha diseñado para manejar perturbaciones en el proceso en casos de emergencia, el diseño del tamaño de éste cilindro debe hacerse para las condiciones del peor caso (v.g., pérdida de agua de enfriamiento o despresurización total de la unidad) y es generalmente bastante grande. En un sistema dedicado solamente al control del COV en la corriente venteada, el diseño del tamaño del cilindro está basado primordialmente en la razón de flujo del gas venteado, dándole consideración al arrastre de líquido.



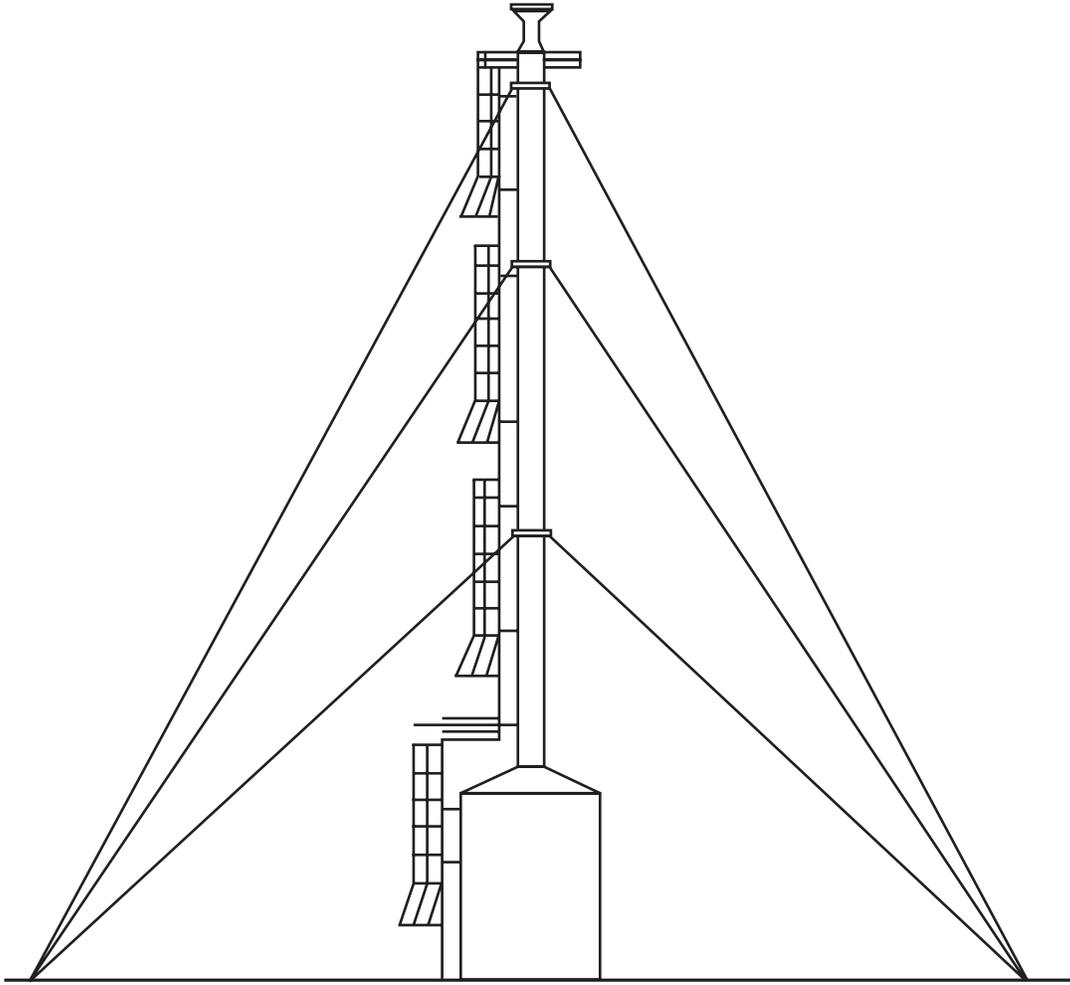
**Figura 1.2:** Cilindro Separador Vertical Típico



**Figura 1.3:** Antorcha Elevada Auto-Sostenida



**Figura 1.4:** Antorcha Elevada Sostenida por Torre



**Figura 1.5:** Antorcha Elevada Sostenida por Retenidas

### 1.2.3 Sello de Líquido

Las corrientes venteadas del proceso son generalmente pasadas a través de un sello de líquido antes de ir a la chimenea de la antorcha. El sello de líquido puede estar corriente abajo del cilindro separador o incorporado en el mismo recipiente. Esto previene posibles retornos de flama, causados cuando el aire es introducido inadvertidamente en el sistema de la antorcha y el frente de la flama es succionado hacia adentro de la chimenea. El sello de líquido también sirve para mantener una presión positiva en la corriente hacia arriba en el sistema y actúa como una mampara mecánica con cualquier onda de choque explosiva en la chimenea. Otros dispositivos, tales como el arrestador de flama y las válvulas de retención (*check valves*), pueden a veces reemplazar un sello de líquido o ser utilizados conjuntamente. El gas de purga (tal como se discute en la Sección 1.3.4), también ayuda a prevenir el retorno de flama en la chimenea de la antorcha, causado por un flujo bajo del gas venteado.

### 1.2.4 Chimenea de la Antorcha

Por razones de seguridad, se utiliza una chimenea para elevar la antorcha. La antorcha debe ser localizada de tal manera que no presente riesgos para las instalaciones circundantes ni al personal. Las antorchas elevadas pueden ser auto-sostenidas (erguida libremente), sostenidas por retenidas o sostenidas estructuralmente por una torre. En las Figuras 1.3, 1.4, y 1.5 se muestran ejemplos de éstos tres tipos de antorchas elevadas para antorchas auto-sostenidas, sostenidas por torres y sostenidas por retenidas, respectivamente. Las antorchas auto-sostenidas son generalmente utilizadas para torres de antorcha de baja altura (30-100 pies), pero pueden ser diseñadas hasta para 250 pies. Las sostenidas por retenidas son diseñadas para alturas mayores a 300 pies, mientras que las de torres son diseñadas para alturas mayores a 200 pies.[4, 6, 7, 8, 9, 10]

Las antorchas erguidas libremente proporcionan un apoyo estructural ideal. Sin embargo, para unidades muy altas, el costo aumenta rápidamente. Adicionalmente, deben tomarse en cuenta los cimientos requeridos y la naturaleza del suelo.

Las antorchas sostenidas por torres deben construirse tan altas como sean requeridas, ya que la carga se distribuye sobre la estructura de la torre. Este diseño toma en cuenta las expansiones diferenciales entre la chimenea, la tubería y la torre.

El soporte de antorcha por retenidas es la más simple de todos los métodos de soporte. Sin embargo, se requiere una cantidad considerable de terreno, puesto que los cables de las retenidas son separados aparte ampliamente. Una regla de dedo para el espacio requerido para erguir una antorcha apoyada por retenidas, es un círculo en el suelo con un radio igual a la altura de la chimenea.[6]

### **1.2.5 Sello de Gas**

El aire puede tender a regresarse hacia dentro de la chimenea debido al viento o a la contracción térmica de los gases de chimenea, creando el potencial de una explosión. Para prevenir esto, típicamente se instala un sello de gas en la chimenea. Un tipo de sello de gas (también referido como sello de antorcha, sello de chimenea, sello de laberinto o barrera de gas), se localiza por debajo de la boquilla de la antorcha para impedir que el flujo del aire se regrese hacia la red de gases de la antorcha. También hay “sellos” que actúan como orificios en la parte superior de la chimenea para reducir el volumen del gas de purga a una velocidad dada e interferir también con el paso del aire a través de la chimenea desde el borde superior. Estos son conocidos con los nombres de “sellos de gas internos, sello fluídico, y sello arrestador”. [5] El diseño de estos sellos es generalmente propiedad industrial y su presencia reduce los requisitos de la operación del gas de purga.

### **1.2.6 Boquilla del Quemador**

La boquilla del quemador, o boquilla de la antorcha, está diseñada para proporcionar una combustión del gas venteado ambientalmente aceptable en todo el rango de capacidad del sistema de la antorcha. Su diseño está generalmente patentado. Se toman en consideración la estabilidad de la flama, la confiabilidad del encendido y la supresión del ruido. La capacidad mínima y máxima de una antorcha para quemar un gas con una flama estable (no necesariamente sin humo), es una función del diseño de la boquilla. La estabilidad de la flama puede mejorarse por dispositivos de retención de flama incorporados en la circunferencia interior de la boquilla. Las boquillas con diseños modernos de retención de flama, pueden tener una flama estable en todo un rango de velocidad de salida de gas de la antorcha de 1 a 600 pies/seg. [2] La capacidad máxima actual de una boquilla está limitada por la presión disponible de la corriente venteada para vencer la caída de presión. Los diámetros de las antorchas elevadas se diseñan normalmente para proporcionar velocidades de vapor a rendimiento máximo de aproximadamente 50 por ciento de la velocidad sónica del gas sujeto a las restricciones del *CFR* 60.18. [1]

### **1.2.7 Quemadores Pilotos**

Las regulaciones de *EPA* requieren la presencia de una flama continua. Se obtiene un encendido confiable por quemadores pilotos continuos diseñados para la estabilidad y localizados alrededor del perímetro exterior de la boquilla de la antorcha. Los quemadores pilotos son encendidos por una sistema de fuente de encendido, el cual puede ser diseñado para activación manual o automática. Los sistemas automáticos son generalmente activados por un dispositivo de detección de flama utilizando un termopar, un sensor infrarrojo ó, más raramente (para aplicaciones de antorcha a nivel del suelo), un sensor ultravioleta. [4]

### **1.2.8 Chorros de Vapor**

Una flama de difusión recibe su oxígeno de combustión por difusión de aire de la atmósfera circundante hacia adentro de la flama. El alto volumen del flujo de combustible en una antorcha puede requerir más aire de combustión a una velocidad más rápida que la que una simple difusión de gas pueda suministrar. Los inyectores de vapor de alta velocidad, localizados alrededor del perímetro exterior de la boquilla, aumentan la turbulencia del gas en la zona límite de la flama, jalando más aire de combustión y mejorando la eficiencia de combustión. Para las antorchas más grandes, el vapor también puede ser inyectado concéntricamente en la punta de la antorcha.

La inyección de vapor en una flama de antorcha puede producir otros resultados además del arrastre de aire y turbulencia. Se han presentado tres mecanismos en los cuales el vapor reduce la formación de humo.[1] Brevemente, una teoría sugiere que el vapor separa la molécula de hidrocarburo, minimizando por consiguiente su polimerización y forma compuestos de oxígeno que arden a una razón reducida y a una temperatura que no conduce a la desintegración y a la polimerización. Otra teoría reclama que el vapor de agua reacciona con las partículas de carbón para formar CO, CO<sub>2</sub>, y H<sub>2</sub>, por consiguiente, removiendo el carbón antes de que se enfríe y forme humo. Un efecto adicional del vapor es reducir la temperatura en el núcleo de la flama y suprime la desintegración térmica.[5] La limitación física en la cantidad de vapor que puede ser suministrado e inyectado a la flama de la antorcha, determina la capacidad no fumígena de la antorcha. La capacidad no fumígena se refiere al volumen de gas que puede ser quemado en una antorcha sin la generación de humo. La capacidad no fumígena es generalmente menor que la capacidad de estabilidad de flama de la boquilla del quemador.

Las desventajas significativas del uso de vapor son el incremento de ruido y costo. El vapor agrava el problema de ruido de la antorcha al producir ruido de chorro de alta frecuencia. El ruido de chorro puede ser reducido por el uso de múltiples pequeños chorros de vapor y si es necesario, por aislamiento acústico. Los inyectores de vapor son generalmente controlados manualmente con el operador observando la flama (directamente o en un monitor de televisión) y agregando vapor según sea requerido para mantener una operación sin humo. Para optimizar el uso de vapor, se dispone de sensores infrarrojos que perciben las características de la flama de la antorcha y ajustan la razón del flujo de vapor automáticamente para mantener una operación sin humo. El control automático, basado en el flujo de gas en la antorcha y en la radiación de la flama, da una respuesta más rápida a la necesidad de vapor y un mejor ajuste de la cantidad requerida. Si se utiliza un sistema manual, debe instalarse un medidor de vapor para aumentar significativamente la conciencia del operador y reducir el consumo de vapor.

### **1.2.9 Controles**

El sistema de control de la antorcha puede ser completamente automatizado ó completamente manual. Los componentes de un sistema de antorchas que puede ser controlado automáticamente incluyen al gas auxiliar, los inyectores de vapor y al sistema de encendido. El

consumo de gas combustible puede ser minimizado midiendo continuamente la razón del flujo de gas venteado y el valor calorífico ( $Btu/ft^3$ ) y ajustando automáticamente la cantidad de combustible auxiliar requerido para mantener el requisito mínimo de  $300 Btu/ft^3$  para antorchas auxiliadas con vapor. El consumo de vapor puede también minimizarse controlando el flujo en base a la razón de flujo del gas venteado. El vapor también puede ser controlado utilizando monitores visuales de humo. Los tableros automáticos de encendido perciben la presencia de la flama con sensores visuales o térmicos y vuelven a encender los pilotos cuando la flama se apaga.

### 1.3 Procedimientos de Diseño

El diseño de la antorcha está influido por varios factores, incluyendo la disponibilidad del espacio, las características del gas de la antorcha (composición, cantidad y nivel de presión) y por consideraciones ocupacionales. El diseño del tamaño de las antorchas requiere la determinación del diámetro de la boquilla de la antorcha y su altura. El énfasis de ésta sección será en el diseño del tamaño de una antorcha elevada auxiliada con vapor para una aplicación determinada.

#### 1.3.1 Requerimientos de Combustible Auxiliar

El diámetro de la boquilla de la antorcha es una función de la razón de flujo del gas venteado más la razón de flujo del combustible auxiliar y del gas de purga. La razón del flujo del gas de purga es relativamente pequeña en relación a las razones de los flujos del gas venteado y del combustible, así que puede ser ignorado cuando se determina el diámetro de la boquilla. La razón del flujo del combustible auxiliar, en caso de que se requiera, es significativa y debe calcularse antes de que el diámetro de la boquilla pueda ser computado..

A algunas antorchas se les proporciona combustible auxiliar para quemar vapores de hidrocarburos cuando una corriente de gas con bajas concentraciones cae por debajo del rango de inflamabilidad ó del poder calorífico necesario para mantener una flama estable. La cantidad de combustible requerida,  $F$ , se calcula en base a mantener el poder calorífico neto de la corriente de gas venteado a un mínimo de  $300 Btu/ft^3$ , requerido por las reglas definidas en el *CFR* (ver la sección siguiente):

$$Q B_v + F B_f = (Q + F) \left( 300 \frac{Btu}{scf} \right) \quad (1.2)$$

donde

$Q$  = la razón del flujo de la corriente venteada,  $scfm$  ( $ft^3/min$  a condiciones normales)

$B_v$  y  $B_f$  son los  $Btu/ft^3$  de la corriente venteada y del combustible, respectivamente.

Ordenando se obtiene:

$$F \text{ (scfm)} = Q \left( \frac{300 - B_v}{B_f - 300} \right) \quad (1.3)$$

El requerimiento anual del combustible,  $F_a$ , se calcula:

$$F_a \left( \frac{\text{Mscf}}{\text{yr}} \right) = F \text{ (scfm)} \cdot 60 \left( \frac{\text{min}}{\text{hr}} \right) \cdot 8760 \left( \frac{\text{hr}}{\text{yr}} \right) = 526 F \frac{\text{scfm}}{\text{yr}} \quad (1.4)$$

Típicamente el gas natural tiene un valor calorífico neto de aproximadamente 1,000  $Btu/ft^3$ . El control automático del combustible auxiliar es ideal para procesos con grandes fluctuaciones en las composiciones de COV. Estas antorchas son utilizadas para la eliminación de corrientes tales como gases residuales de azufre y de amoníaco, así también como cualquier corriente venteada con bajo  $Btu$ . [2]

### 1.3.2 Diámetro de la Boquilla de la Antorcha

Se diseña el diámetro de la boquilla típicamente en base a la velocidad, aunque la caída de presión también debe ser verificada. El diseño del tamaño de las boquillas de la antorcha, utilizadas para cumplir con las normas de emisiones de EPA, está regido por las reglas definidas en el Registro Federal (véase 40 CFR 60.18). Para cumplir con estos requisitos, la velocidad máxima de una antorcha elevada auxiliada con vapor, está dada en la Tabla 1.1:

**Tabla 1.1:** Velocidad Máxima de Antorcha Elevada Auxiliada con Vapor.

Poder calorífico neto de la corriente venteada $B_v$ ( $Btu/ft^3$ )	Velocidad máxima $V_{max}$ ( $ft/sec$ )
300	$\log_{10} (V_{max}) = \frac{(B_v + 1,214)}{852}$
300 - 1,000 > 1,000	

Al determinar la velocidad máxima permitida,  $V_{max}$  (ft/sec), y conociendo la razón del flujo volumétrico total,  $Q_{tot}$  (ft<sup>3</sup>/min reales), incluyendo la corriente venteada y el gas combustible auxiliar, se puede calcular un diámetro mínimo para la boquilla,  $D_{min}$  (in). Es una práctica normal diseñar el tamaño de la antorcha de tal manera que la velocidad de diseño de la razón de flujo  $Q_{tot}$ , sea 80 por ciento de  $V_{max}$ , v.g.:

$$D_{min} \text{ (in)} = 12 \sqrt{\frac{\frac{4}{\pi} \frac{Q_{tot}}{60 \left(\frac{sec}{min}\right)}}{0.8 V_{max}}} = 1.95 \sqrt{\frac{Q_{tot}}{V_{max}}} \quad (1.5)$$

donde

$$Q_{tot} = Q + F \text{ (medidos a la temperatura y presión de la corriente)}$$

El diámetro de la boquilla de la antorcha,  $D$ , es el diámetro calculado,  $D = D_{min}$ , redondeado al siguiente tamaño comercial disponible. El tamaño mínimo de la antorcha es de 1 pulgada; están disponibles tamaños más grandes en incrementos de 2 pulgadas desde 2 hasta 24 pulgadas y en incrementos de 6 pulgadas para tamaños mayores de 24 pulgadas. El tamaño máximo disponible comercialmente es de 90 pulgadas.[5]

En este punto se requiere calcular la caída de presión para asegurar que la corriente venteada tiene suficiente presión para vencer la caída de presión que ocurre a través del sistema de la antorcha, a las condiciones de flujo máximo. El cálculo de la caída de presión es específico del sitio, pero deben tomarse en cuenta las pérdidas a través del cabezal recolector y la tubería, el cilindro separador, el sello de líquido, la chimenea, el sello de gas y finalmente la boquilla de la antorcha. El tamaño de la tubería debe suponerse igual al diámetro de la boquilla. Típicamente se utiliza tubería de acero al carbón cédula 40. Si no se dispone de suficiente presión, debe evaluarse la factibilidad económica de un sistema ya sea más grande (la caída de presión es inversamente proporcional al diámetro de la tubería) ó de un manejador tal como un ventilador ó un compresor. (Refiérase a la Sección 1.3.8 para relaciones típicas de caídas de presión).

### 1.3.3 Altura de la Antorcha

La altura de la antorcha se determina en base a las limitaciones a nivel del suelo de la intensidad de radiación térmica, luminosidad, ruido, altura de las instalaciones vecinas y a la dispersión de los gases extraídos. Adicionalmente, también se debe considerar la dispersión de la pluma en el caso de una posible falla de encendido de la emisión. El diseño del tamaño de las antorchas industriales se hace normalmente para una intensidad máxima de calor de 1,500-2,000

$Btu/hr-ft^3$  cuando la combustión en la antorcha está en su máxima capacidad de diseño.[1,2] A éste nivel de intensidad de calor, los trabajadores pueden permanecer en el área de la antorcha solamente por un tiempo limitado. Si, sin embargo, se requiere que el personal de operación permanezca en el área de la unidad realizando sus funciones, el nivel de diseño de radiación recomendado, excluyendo la radiación solar, es de  $500 Btu/hr-ft^3$ . [1] La intensidad de la radiación solar está en el rango de  $250-330 Btu/hr-ft^3$ . [1] La altura de la antorcha también puede estar determinada por la necesidad de dispersar el gas venteado de manera segura en caso de que la flama se apague. La altura en estos casos debe basarse en el modelo de dispersión para las condiciones particulares de la instalación y no se discute en ésta sección. La altura mínima normalmente utilizada es de 30 pies.[5] La Ecuación (1.6) de Hajek y Ludwig puede ser usada para determinar la distancia mínima,  $L$ , requerida desde el centro de la flama de la antorcha y un punto de exposición donde la radiación térmica debe limitarse.[1]

$$L^2 \text{ (ft}^2\text{)} = \frac{\tau f R}{4 \pi K} \quad (1.6)$$

donde

$J$	=	fracción de intensidad de calor transmitida
$f$	=	fracción de calor radiado
$R$	=	calor neto liberado ( $Btu/hr$ )
$K$	=	radiación permitida ( $500 Btu/hr-ft^3$ )

El enfoque conservador del diseño aquí usado, ignora el efecto del viento y calcula la distancia suponiendo que el centro de radiación está en la base de la flama (en la punta de la antorcha), no en el centro. También se supone que la localidad donde la radiación térmica debe limitarse está en la base de la antorcha. Por lo tanto, la distancia,  $L$ , es igual a la altura requerida para la chimenea ( que es un mínimo de 30 pies). El factor  $f$  toma en cuenta que no todo el calor liberado en la flama puede ser liberado como radiación. La transferencia de calor se propaga a través de tres mecanismos: conducción, convección y radiación. La radiación térmica puede ser absorbida, reflejada o transmitida. Como la atmósfera no es un vacío perfecto, una fracción del calor radiado no se transmite debido a la absorción atmosférica ( humedad, materia particulada). Para propósitos de estimación, sin embargo, se supone que todo el calor radiado es transmitido (v.g.,  $r = 1$ ). La Tabla 1.2 es un resumen del calor radiado por diferentes flamas gaseosas de difusión:[1]

**Tabla 1.2:** Calor de Varias Flamas Gaseosas de Difusión

Gas	Diámetro de la Boquilla (in)	Fracción de Calor Radiado (f)
Hidrógeno	<1	.10
	1.6	.11
	3.3	1.6
	8.0	1.5
	16.0	1.7
Butano	<1	.29
	1.6	.29
	3.3	.29
	8.0	.28
	16.0	.30
Metano	<1	.16
	1.6	.16
	3.3	.15
Gas Natural	8.0	.19
	16.0	.23

Por lo general, la fracción de calor radiado aumenta a medida que aumenta el diámetro de la chimenea. Si no se dispone de datos específicos de la corriente, un diseño en base a  $f = 0.2$  dará resultados conservadores.[4] La liberación de calor,  $R$ , se calcula de la razón del flujo de gas de la antorcha,  $W$ , y del poder calorífico neto,  $B_v$ , de la siguiente manera:

$$R \left( \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \right) = W \left( \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \right) B_v \left( \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right) \quad (1.7)$$

### 1.3.4 Requerimientos del Gas de Purga

El flujo volumétrico total de la flama debe ser controlado cuidadosamente para prevenir problemas de retorno de flama por bajo flujo y evitar la inestabilidad de la flama. El gas de purga, típicamente gas natural,  $N_2$  ó  $CO_2$ , se usa para mantener el mínimo flujo positivo requerido a través del sistema. Si hay la posibilidad de aire en el múltiple de la antorcha, debe usarse  $N_2$ , otro gas inerte ó un gas inflamable para prevenir la formación de una mezcla explosiva en el sistema de la antorcha. Para asegurar un flujo positivo a través de todos los componentes de la antorcha, la inyección de gas de purga debe hacerse en el punto más alto en la tubería de transporte de la antorcha.

El requerimiento mínimo de gas de purga continuo está determinado por el diseño de los sellos de la chimenea, los cuales son generalmente dispositivos patentados. Los sellos modernos de gas internos y de laberinto, requieren una velocidad de gas de 0.001 a 0.04 *ft/sec* (a condiciones normales).[6, 7, 8, 9, 10] Usando un valor conservador de 0.04 *ft/sec* y conociendo el diámetro de la antorcha (*in*), puede calcularse el volumen anual del gas de purga,  $F_{pu}$ :

$$\begin{aligned}
 F_{pu} \left( \frac{Mscf}{yr} \right) &= \left( 0.04 \frac{ft}{sec} \right) \left( \frac{\pi D^2}{144} ft^2 \right) \left( 3,600 \frac{sec}{hr} \right) \left( 8,760 \frac{hr}{yr} \right) \\
 &= 6.88 D^2 \left( \frac{Mscf}{yr} \right)
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

Existe otra velocidad mínima de boquilla de la antorcha para una operación sin retorno o inestabilidad de flama . Esta velocidad mínima depende de la composición del gas y del diámetro y puede variar desde cantidades insignificantes en antorchas pequeñas hasta 0.5 *ft/sec* en unidades con diámetros de más de 60 pulgadas.[5]

También se requiere el gas de purga para eliminar el aire en el sistema antes del arranque y prevenir un vacío que succione el aire dentro del sistema después de que se quemara una descarga de gas caliente. (El enfriamiento de los gases dentro del sistema de antorcha puede crear un vacío.) Se supone que el consumo de gas de purga para estos usos es menor.

### 1.3.5 Requerimientos de Gas Para el Piloto

El número de pilotos requerido depende del tamaño de la antorcha y posiblemente de la composición del gas de la antorcha y de las condiciones de viento. El uso del gas para el piloto es una función del número de quemadores requeridos para asegurar una ignición positiva del gas a quemar, del diseño de los pilotos y del modo de operación. El consumo promedio del gas para el piloto en base a un modelo de consumo eficiente de energía es de 70 *ft<sup>3</sup>/hr* (para un gas típico de 1000 *Btu por ft<sup>3</sup>*), por quemador piloto.[6, 7, 8, 9, 10] El número de quemadores pilotos, *N*, en base al tamaño de la antorcha es:[6, 7, 8, 9, 10]

**Tabla 1.3:** Número de Quemadores Pilotos por Diámetro de la Boquilla de la Antorcha

Diámetro de la Boquilla de la Antorcha (in)	Número de Pilotos (N)
1-10	1
12-24	2
30-60	3
>60	4

El consumo anual de gas para el piloto,  $F_{pi}$  se calcula por:

$$F_{pi} \left( \frac{\text{Mscf}}{\text{yr}} \right) = \left( 70 \frac{\text{scf}}{\text{hr}} \right) (N) \left( 8,760 \frac{\text{hr}}{\text{yr}} \right) = \left( 613 \frac{\text{scf}}{\text{yr}} \right) N \quad (1.9)$$

### 1.3.6 Requerimientos de Vapor

Los requerimientos de vapor dependen de la composición del gas venteado que es quemado, la velocidad del vapor de la boquilla de inyección y el diámetro de la boquilla de la antorcha. Aunque algunos gases pueden ser quemados sin humo sin vapor, típicamente se requieren de 0.01 a 0.6 libras de vapor por libra de gas quemado.[6, 7, 8, 9, 10] La relación es estimada usualmente a partir del peso molecular del gas, la relación de carbón a hidrógeno en el gas, o si el gas es saturado o no. Por ejemplo, olefinas como el propileno, requieren relaciones de vapor más altas que las que requerirían las parafinas de hidrocarburos para ser quemadas sin humo.[2]

En cualquier caso, si se compra una antorcha sin humo, patentada, debe consultarse al fabricante acerca de la relación mínima de vapor necesaria. Una boquilla con un diámetro pequeño (menos de 24 pulgadas), puede usar vapor más eficazmente que una boquilla de mayor diámetro para mezclar el aire en la flama y promover turbulencia. [2] Para una refinería típica, el requerimiento promedio de vapor es típicamente 0.25 lb/lb, con este número aumentando hasta 0.5 lb/lb en plantas de substancias químicas donde se queman por antorcha grandes cantidades de hidrocarburos no saturados.[10]

Por consideraciones generales, se puede suponer que la cantidad de vapor requerida,  $S$ , es de 0.4 libras de vapor por libra de gas de la antorcha,  $W$ . Utilizando una relación de 0.4, la cantidad requerida de vapor es:

$$S \left( \frac{\text{lbs}}{\text{yr}} \right) = \left( 0.4 \frac{\text{lb vapor}}{\text{lb gas de antorcha}} \right) \left( W \frac{\text{lb}}{\text{yr}} \right) \left( 8,760 \frac{\text{hr}}{\text{yr}} \right) \quad (1.10)$$

El operar una antorcha con una relación alta de vapor-a-gas, no sólo es costoso, sino que también resulta en una eficiencia de combustión baja y en una molestia de ruido. La capacidad de una antorcha auxiliada con vapor para quemar sin humo puede estar limitada por la cantidad de vapor disponible.

### 1.3.7 Cilindro Separador

Como se explicó previamente, el cilindro separador se utiliza para remover cualquier líquido que pueda estar en la corriente venteada. Se utilizan dos tipos de cilindros: horizontal y vertical. La factibilidad económica del diseño del recipiente influye en la selección entre un cilindro horizontal ó uno vertical. Cuando se requiere un gran recipiente de almacenamiento de líquido, generalmente un cilindro horizontal es más económico. Los separadores verticales son utilizados cuando la carga de líquido es pequeña, el espacio es limitado o donde se desea fácil nivel de control. Aquí se supone que no se diseña el tamaño del cilindro para descargas de emergencia y que el flujo del líquido es mínimo. Las antorchas diseñadas para controlar corrientes venteadas continuas, típicamente tienen separadores verticales, mientras que las antorchas de emergencias tienen recipientes horizontales. El proceso descrito más adelante se aplica exclusivamente a cilindros verticales. En la Figura 1.2 se presenta un cilindro vertical típico.

Las partículas líquidas se separarán cuando el tiempo de residencia del vapor es mayor que el tiempo requerido para recorrer la altura vertical disponible a la velocidad de caída de las partículas líquidas, v.g., la velocidad es menor que la velocidad de caída. Además, la velocidad vertical del gas debe ser lo suficientemente baja para permitir que las gotas líquidas caigan. Puesto que las antorchas son diseñadas para manejar gotas de líquido pequeñas, la velocidad vertical permitida está basada en la separación de gotas de 300 a 600 micras de diámetro.[1] La velocidad de caída,  $U$ , de una partícula en una corriente, o la velocidad máxima de diseño, se calcula como sigue:[11]

$$U \left( \frac{\text{ft}}{\text{sec}} \right) = G \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v}} \quad (1.11)$$

donde

$G$  = factor de diseño de la velocidad del vapor  
 $\rho_l$  y  $\rho_v$  = densidades del líquido y del vapor, lb/ft<sup>3</sup>

Nótese que en la mayoría de los casos,

$$\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v} \approx \frac{\rho_l}{\rho_v} \quad (1.11a)$$

El factor de diseño de la velocidad del vapor,  $G$ , varía desde 0.15 a 0.25 para separadores verticales por gravedad a 85% de inundación.[11]

Una vez que la velocidad de diseño del vapor ha sido determinada, el área mínima de la sección transversal del recipiente,  $A$ , puede ser calculada por:

$$A \text{ (ft}^2\text{)} = \frac{Q_a \left( \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \right)}{\left( 60 \frac{\text{sec}}{\text{min}} \right) \left( U \frac{\text{ft}}{\text{sec}} \right)} \quad (1.12)$$

donde  $Q_a$  es el flujo de gas en  $\text{ft}^3/\text{min}$  actuales

El diámetro del recipiente,  $d_{\min}$ , se calcula entonces por:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{4}{\pi} A} \quad (1.13)$$

De acuerdo a las dimensiones de los cabezales estándares, se suponen incrementos de 6 pulgadas para los diámetros del cilindro, así que:

$$d = d_{\min} \text{ (redondeado hacia el tamaño mayor)} \quad (1.14)$$

El tamaño de algunos cilindros verticales se diseña como ciclones y utilizan una entrada tangencial para generar velocidades horizontales de separación. Los recipientes verticales cuyo tamaño se diseña exclusivamente a velocidades de asentamiento (como en el párrafo anterior), serán más grandes que aquellos diseñados como ciclones.[5]

El espesor del recipiente,  $t$ , se determina a partir del diámetro tal como se muestra en la Tabla 1.4 [15]. La altura apropiada para un recipiente,  $h$ , se determina generalmente en base al volumen del líquido de compensación. Se verifica entonces la altura calculada para asegurar que la relación altura-diámetro está dentro del rango económico de 3 a 5.[11] Para volúmenes pequeños de líquido, como en el caso de controles continuos de COV venteados, es necesario proporcionar más líquido de compensación que el necesario para satisfacer la condición de  $h/d > 3$ . Así, para el propósito de diseñar el tamaño del cilindro separador:

$$h = 3d \quad (1.15)$$

**Tabla 1.4:** Espesor del Recipiente Basado en el Diámetro

Diámetro, $d$ (pulgadas)	Espesor, $t$ (pulgadas)
$d < 36$	0.25
$36 < d < 72$	0.37
$72 < d < 108$	0.50
$108 < d < 144$	0.75
$d > 144$	1.0

### 1.3.8 Sistema Manejador de Gas

La caída de presión total del sistema es una función de la presión disponible de la corriente venteada, del diseño de los diferentes componentes del sistema y de la razón de flujo del gas de la antorcha. La estimación de los requerimientos de la caída de presión real, involucra cálculos complejos basados en las propiedades específicas del gas venteado del sistema y del equipo utilizado. Para los fines de ésta sección, sin embargo, pueden utilizarse valores aproximados. La caída de presión de diseño a través de la boquilla de la antorcha puede variar de 0.1 a 2 *psi* con las siguientes relaciones aproximadas de caída de presión:[5] La caída de presión total del sistema varía de cerca de 1 a 25 *psi*. [5]

**Tabla 1.5:** Pérdidas de Presión de Diseño a Través de la Boquilla de la Antorcha

Equipo	Pérdida de presión aproximada
Sello de gas:	1 a 3 veces la caída de presión de la boquilla
Chimenea:	0.25 a 2 veces la caída de presión de la boquilla
Sello líquido y Cilindro Separador:	1 a 1.5 veces la caída de presión de la boquilla <i>mas</i> la caída de presión debida a la profundidad del líquido en el sello, que es normalmente de 0.2 a 1.5 <i>psi</i> .
Sistema recolector de gas:	calculado en base al diámetro, la longitud y el flujo. El tamaño del sistema lo determina el diseñador para utilizar la caída de presión disponible y dejar una presión en la base de la chimenea entre 2 y 10 <i>psi</i> .

## 1.4 Estimación de la Inversión de Capital Total

En esta sección se presentan los costos de capital de un sistema de antorcha y se basan en los procedimientos de diseño discutidos en la Sección 1.3. Los costos presentados están en dólares de Septiembre del 2000.<sup>1</sup> Los costos de capital para éste capítulo fueron actualizados por medio de contactos con proveedores en el verano del 2000. Estos costos fueron actualizados, enviándoles a los proveedores, tablas y gráficas de ecuaciones de costo preexistentes y pidiéndoles que actualizaran la información.

Los proveedores reportaron que los costos no habían aumentado significativamente desde 1990, citando como razones principales para la estabilización de precios, el aumento en la competencia y precios más bajos del acero. Un proveedor reportó un ligero aumento a través del período y otro reportó una ligera disminución. Los proveedores estuvieron de acuerdo en que los costos calculados en 1990 reflejaban las condiciones actuales del mercado. Algunos artículos, excepto las plataformas y las escaleras, podrían resultar con variaciones alrededor de éstos precios. Basándose en la información proporcionada por los proveedores, se trasladaron los precios de 1990 al año 2000 y son los presentados en las Tablas 1.6 a 1.8 y Figuras 1.5 a 1.7 [2][7]

La inversión de capital total (*Total capital investment*), *TCI*, incluye los costos de equipo, *EC*, para la antorcha misma, el costo del equipo auxiliar, el costo de los impuestos, fletes, instrumentación y todos los costos directos e indirectos de instalación.

El costo de capital de la antorcha depende del grado de sofisticación deseado (v.g., control manual vs. automático) y del número de accesorios seleccionados, tales como cilindros separadores, sellos, controles, escaleras y plataformas. La estructura de sostenimiento básica de la antorcha, el tamaño y altura y el equipo auxiliar son los factores que controlan el costo de la antorcha. La inversión de capital también dependerá de la disponibilidad de servicios como gas natural, vapor y aire para instrumentación.

La inversión de capital total es una estimación limitada del costo y no prevé la inclusión de servicios, apoyos o caminos de acceso al sitio, las instalaciones de reserva, el terreno, la investigación y desarrollo requeridos o la tubería del proceso y las interconexiones de instrumentación que pueden ser requeridas en el proceso que genera el gas residual. Éstos costos están basados en la instalación de una planta nueva; no se incluyen los costos de reconversión tales como los de demolición, aglomeraciones por las condiciones del trabajo de construcción, la programación de los horarios de construcción y los de producción y las largas tuberías de interconexión. Éstos factores son tan específicos de cada sitio que no se intentará el cálculo de su costo.

---

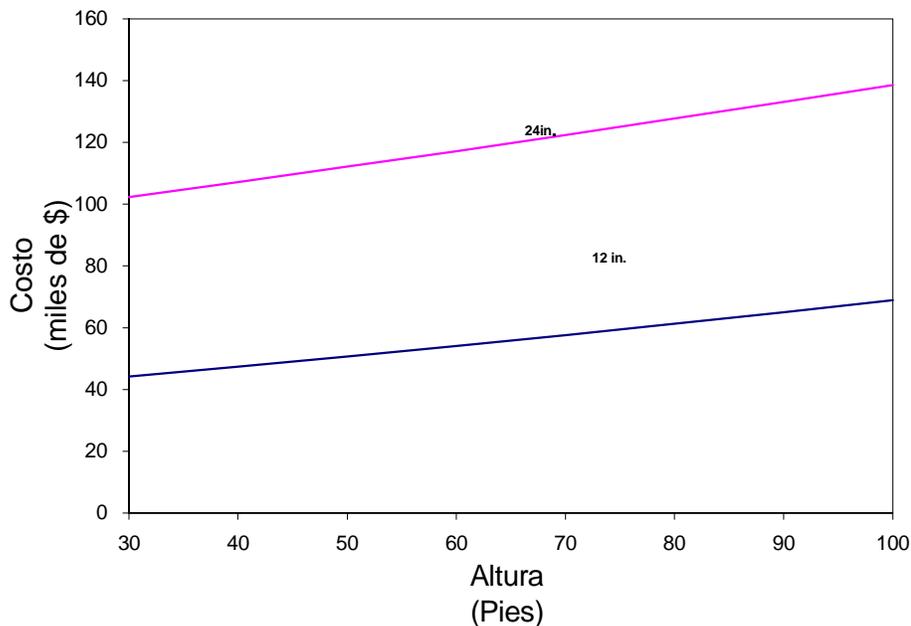
<sup>1</sup>Para información sobre el incremento de precios a valores en dólares más actuales, refiérase al reporte de EPA Indices de Escalamiento de Costos de Controles de la Contaminación del Aire (*Escalation Indexes for Air Pollution Control Costs*) y las consecuentes actualizaciones, los cuales están en el *OAQPS Technology Transfer Network (CTC Bulletin Board)*.

### 1.4.1 Costos de Equipo

Se les pidió a los proveedores de antorcha que proporcionaran presupuestos estimados para el espectro de tamaños comerciales de antorchas. Estas cotizaciones [6, 7, 8, 9, 10] fueron usadas para desarrollar correlaciones de costo de equipo para unidades de antorcha, mientras que las ecuaciones de costo para el equipo auxiliar fueron basadas en las referencias [12] y [13] (cilindro separador) y [14] y [15] (tubería). La exactitud esperada de éstos costos es de  $\pm 30\%$

**Tabla 1.6:** Costos de Antorcha Auto-Sostenida

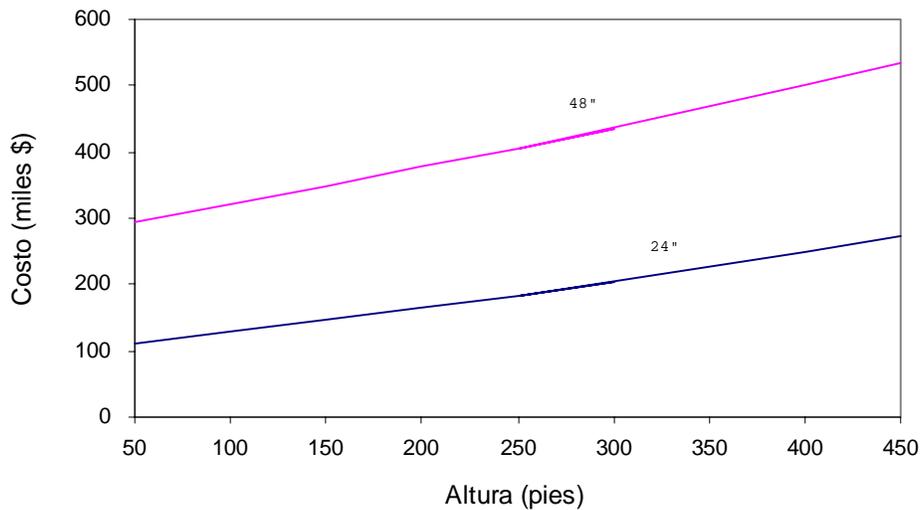
D (Diámetro en pulgadas)	Hf (Altura en pies)	Año 2000 (En dólares)
12	30	\$44,163
12	40	\$47,367
12	50	\$50,684
12	60	\$54,112
12	70	\$57,653
12	80	\$61,306
12	90	\$65,071
12	100	\$68,948
24	30	\$102,291
24	40	\$107,138
24	50	\$112,098
24	60	\$117,169
24	70	\$122,353
24	80	\$127,649
24	90	\$133,057
24	100	\$138,578



**Figura 1.5:** Costos Capitales de Antorchas Auto sostenidas de 12 in. y 24 in. de diámetro

**Tabla 1.7:** Costos de Antorchas Sostenidas por Vientos

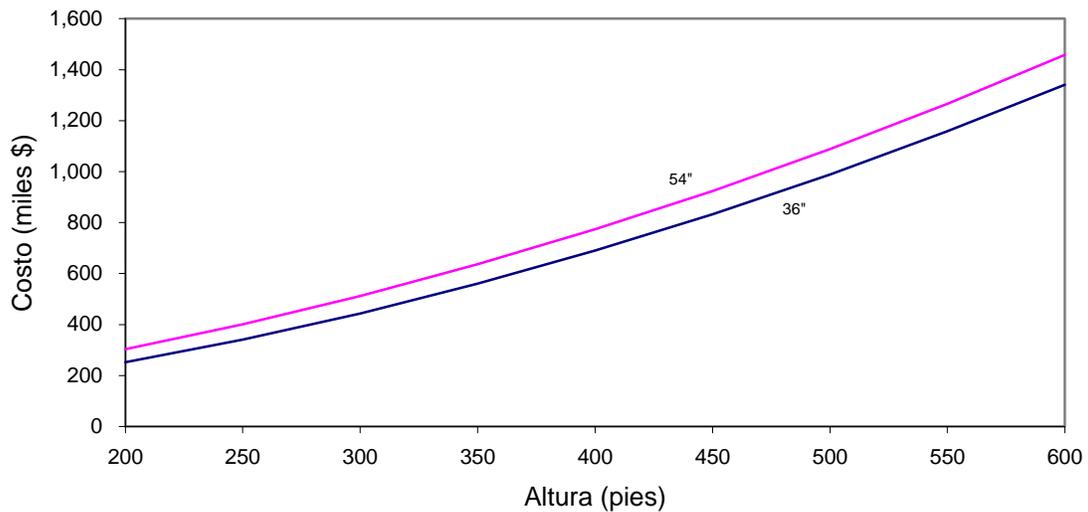
Df (Diámetro en pulgadas)	Hf (Altura en pies)	Año 2000 (En dólares)
24	50	\$112,104
24	100	\$128,393
24	150	\$145,787
24	200	\$164,284
24	250	\$183,887
24	300	\$204,593
24	250	\$183,887
24	400	\$249,320
24	450	\$273,341
48	50	\$295,001
48	100	\$321,081
48	150	\$348,265
48	200	\$376,554
48	250	\$405,947
48	300	\$436,445
48	250	\$405,947
48	300	\$436,445
48	250	\$405,947
48	400	\$500,754
48	450	\$534,566



**Figura 1.6:** Costos de capital de antorchas sostenidas con retenidas con diámetros de 24 in. y 48 in.

**Tabla 1.8:** Costos de Antorchas Sostenidas por Torres

Df (Diámetro en pulgadas)	Hf (Altura en pies)	Año 2000 (En dólares)
36	200	\$252,325
36	250	\$341,430
36	300	\$443,982
36	350	\$559,983
36	400	\$689,431
36	450	\$832,328
36	500	\$988,672
36	550	\$1,158,465
36	600	\$1,341,705
54	200	\$303,910
54	250	\$401,044
54	300	\$511,625
54	350	\$635,655
54	400	\$773,133
54	450	\$924,059
54	500	\$1,088,433
54	550	\$1,266,255
54	600	\$1,457,525



**Figura 1.7:** Costos de capital de antorchas sostenidas por torres con diámetros de 36 in .y 54 in .

(v.g., estimaciones de “estudio”). Teniendo en mente las restricciones de altura discutidas en la Sección 1.2.4, éstas correlaciones de costos se aplican a boquillas de antorchas con diámetros que varían de 1 a 60 pulgadas y a alturas de chimenea que varían de 30 a 500 pies. El material de construcción estándar es acero al carbón excepto cuando el uso de otro material es la norma, como es el caso de las boquillas de quemador.

Los costos de la antorcha,  $C_F$  presentados en las Ecuaciones 1.16 a 1.18 se calculan como una función de la altura de la chimenea,  $L$  (ft) (30ft mínimo) y del diámetro de boquilla,  $D$  (in), y se basan en el tipo de soporte de la siguiente manera:

Grupo auto-sostenido:

$$C_F (\$) = (78.0 + 9.14D + 0.749L)^2 \quad (1.16)$$

Grupo sostenido por retenidas:

$$C_F (\$) = (103 + 8.68D + 0.470L)^2 \quad (1.17)$$

Grupo sostenido por torres:

$$C_F (\$) = (76.4 + 2.72D + 1.64L)^2 \quad (1.18)$$

Estas ecuaciones son regresiones por mínimos cuadrados de los datos de costos proporcionados por diferentes proveedores. Debe mantenerse en mente que aún para una determinada tecnología de antorcha (v.g., elevada, auxiliada con vapor), los procedimientos de diseño y de manufactura varían de proveedor a proveedor, así que los costos pueden variar. Una vez que se completa una estimación de estudio, se recomienda solicitar estimaciones de costos más detalladas a varios proveedores.

Cada uno de éstos costos incluye la torre de la antorcha (chimenea) y el soporte, la boquilla del quemador, los pilotos, la tubería de los servicios desde la base (vapor, gas natural), la medición y el control de los servicios, el sello líquido, el sello de gas y los cubos de las escaleras y plataformas galvanizadas según se requieran. Los costos se basan en construcciones con acero al carbón, excepto por los cuatro pies superiores y la boquilla del quemador, los cuales se basan en acero inoxidable 310.

Los requerimientos del recolector de gas y de la línea de transferencia son muy específicos para el sitio y dependen de la instalación del proceso donde se genera la emisión y donde está localizada la antorcha. Para el propósito de estimar el costo de capital, se supone que la línea de transferencia tendrá el mismo diámetro que el de la boquilla de la antorcha[6] y será de 100 pies de largo. La mayoría de las instalaciones requieren tubería más extensa, así que 100 pies se considera un mínimo.

Los costos de la tubería del gas de venteo,  $C_p$ , se presentan en la Ecuación 1.19 ó 1.20 y están en función del diámetro de la tubería o de la antorcha  $D$ . [15]

$$C_p (\$) = 127D^{1.21} \text{ (donde } 1'' < D < 24'') \quad (1.19)$$

$$C_p (\$) = 139D^{1.07} \text{ (donde } 30'' < D < 60'') \quad (1.20)$$

Los costos,  $C_p$ , incluyendo la tubería recta de acero al carbón cédula 40 solamente, se basan en 100 pies de tubería y son directamente proporcionales a la distancia requerida.

Los costos para un cilindro separador,  $C_K$ , se presentan separadamente en la Ecuación 1.22 y están en función del diámetro del cilindro,  $d$  (in) y de la altura,  $h$  (in). [12, 13]

$$C_K (\$) = 14.2 [dt (h + 0.812d)]^{0.737} \quad (1.21)$$

donde  $t$  es el espesor del recipiente, en pulgadas, determinado en base al diámetro.

El costo de equipo del sistema de antorcha,  $EC$ , es el total de los costos calculados de la antorcha, cilindro separador y tubería.

$$EC (\$) = C_F + C_K + C_p \quad (1.22)$$

Los costos del equipo comprado,  $PEC$ , son iguales al costo del equipo,  $EC$ , más los factores de la instrumentación suplementaria (v.g., instrumentos del cuarto de control) (0.10), impuestos sobre la venta (0.03) y fletes (0.05) ó,

$$PEC (\$) = EC (1 + 0.10 + 0.03 + 0.05) = 1.18 EC \quad (1.23)$$

#### 1.4.2 Costos de Instalación

La inversión de capital total,  $TCI$ , se obtiene multiplicando el costo del equipo comprado,  $PEC$ , por un factor de instalación de 1.92.

$$TCI (\$) = 1.92 PEC \quad (1.24)$$

Estos costos fueron determinados en base a los factores de la Tabla 1.6. En la Tabla 1.5 se dan las bases utilizadas en el cálculo de los factores de costo anual. Estos factores abarcan a los costos de instalación directos e indirectos. Los costos de instalación directos cubren cimientos y soportes, manejo de equipo y edificación, tubería, aislantes, pintura e instalaciones eléctricas. Los costos de instalación indirecta cubren los gastos de ingeniería, construcción y de campo, honorarios de los contratistas, arranque, pruebas de funcionamiento y contingencias. Dependiendo de las condiciones del sitio, los costos de instalación para una antorcha determinada pueden variar significativamente de los costos generados por estos factores promedios. Vatavuk y Neveril proporcionan ciertas instrucciones para ajustar los factores promedio de instalación a condiciones fuera de lo común. [1]

El uso de vapor como supresor de humos puede representar tanto como el 90% ó más de los costos directos totales anuales.

## 1.5 Estimación de los Costos Totales Anuales

El costo total anual,  $TAC$ , es la suma de los costos indirectos y directos anuales. En la Tabla 1.2 se dan las bases utilizadas al calcular los factores de costos anuales.

### 1.5.1 Costos Directos Anuales

Los costos directos anuales incluyen los costos de mano de obra (de operación y supervisión), de mantenimiento (mano de obra y materiales), gas natural, vapor y electricidad. A menos que la antorcha vaya a ser dedicada a una sola corriente venteada y que se conozcan los factores específicos de la operación en línea, los costos deben calcularse en base a una operación continua de 8,760 hr/año y expresarse en base anual. Las antorchas que dan servicio a múltiples unidades de proceso, típicamente operan en forma continua por varios años entre períodos de paro por mantenimiento.

Se estima la mano de obra de operación en 360 horas anuales.[3] Un sistema completamente manual podría fácilmente requerir 1,000 horas. Debe suponerse una relación estándar de supervisión de 0.15 . La mano de obra de mantenimiento puede estimarse en 0.5 horas por turno de 8-horas. Se supone que los costos de los materiales de mantenimiento son iguales a los costos de mano de obra. Los costos de los servicios de la antorcha incluyen gas natural, vapor y electricidad.

Los sistemas de combustión por antorcha pueden usar gas natural de tres maneras: en los quemadores pilotos que queman gas natural; al quemar corrientes venteadas de bajo  $Btu$  que requieren de gas natural como combustible auxiliar y como gas de purga. El costo total del gas natural,  $C_p$  para operar un sistema de antorcha incluye los costos del gas de piloto,  $C_{pi}$ , combustible auxiliar,  $C_a$ , y gas de purga,  $C_{pu}$ :

$$C_f \left( \frac{\$}{\text{yr}} \right) = C_{pi} + C_a + C_{pu} \quad (1.25)$$

donde,  $C_{pi}$  es igual al volumen anual del gas del piloto,  $F_{pi}$ , multiplicado por el costo por pies cúbico estándar ( $scf$ ),  $Cost_{fuel}$ :

$$C_{pi} \left( \frac{\$}{\text{yr}} \right) = \left( F_{pi} \frac{\text{scf}}{\text{yr}} \right) \left( Cost_{fuel} \frac{\$}{\text{scf}} \right) \quad (1.26)$$

$C_a$  y  $C_{pu}$  son calculados similarmente.

El costo del vapor ( $C_s$ ) para eliminar el humo es igual a la cantidad anual de consumo de vapor, multiplicada por el costo por libra ( $lb$ ),  $Cost_{Stream}$ :

$$C_s \left( \frac{\$}{\text{yr}} \right) = \left( 8,760 \frac{\text{hr}}{\text{yr}} \right) \left( S \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \right) \left( Cost_{steam} \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \right) \quad (1.27)$$

## 1.5.2 Costos Indirectos Anuales

Los costos indirectos anuales (fijos) incluyen otros gastos, recuperación de capital, gastos administrativos ( $G \& A$ ), impuestos prediales y primas del seguro. En la Tabla 1.9 se presentan los factores de costos anuales sugeridos.

Los gastos generales se calculan como el 60% de los costos de mano de obra total (de operación, supervisión y mantenimiento) y los costos de los materiales de mantenimiento. En la Sección 1 de este Manual se discuten los otros costos.

El costo de recuperación de capital del sistema,  $CRC$ , está basado en una vida de equipo aproximada de 15 años. (Véase la Sección 1 de éste Manual para una discusión detallada del costo de recuperación de capital y las variables que lo determinan.) Para una vida de equipo de 15 años y una tasa de interés de 7%, el factor de recuperación de capital es 0.1098. El costo de recuperación de capital del sistema es el producto del factor de recuperación de capital,  $CRF$ , y de la inversión de capital total,  $TCI$ , ó:

$$CRC \left( \frac{\$}{\text{yr}} \right) = CRF \times TCI = 0.1098 \times TCI \quad (1.28)$$

**Tabla 1.9:** Factores de Costo de Capital para Sistemas de Antorcha

<b>Artículo de costo</b>	<b>Factor</b>
<b>Costos Directos</b>	
Costos de equipo comprado	
Sistema de antorcha, <i>EC</i>	Según sea estimado, A
Instrumentación	0.10 A
Impuestos sobre venta	0.03 A
Fletes	0.05 A
Costos de equipo comprado, <i>PEC</i>	$B = 1.18 A$
<b>Costos directos de instalación</b>	
Cimientos y soportes	0.12 B
Manejo y edificación	0.40 B
Instalaciones eléctricas	0.01 B
Tubería	0.02 B
Aislante	0.01 B
Pintura	0.01 B
Costos directos de instalación	0.57 B
Preparación del sitio	
Según sea requerido, <i>SP</i>	
Edificios	
Según sea requerido, <i>Bldg.</i>	
Costos directos totales, <i>DC</i>	$1.57 B + SP + Bldg.$
<b>Costos indirectos anuales, <i>IC</i></b>	
Ingeniería	0.10 B
Gastos de construcción y en el campo	0.10 B
Honorarios del Contratista	0 B
Arranque	0.01 B
Prueba de funcionamiento	0.01 B
Contingencias	0.03 B
Costos indirectos totales, <i>IC</i>	0.35 B
Inversión de capital total = <i>DC + IC</i>	$1.92 B + SP + Bldg.$

Tal como se muestra en la Tabla 1.10, los costos *G & A*, impuestos y primas del seguro pueden estimarse a 2%, 1%, y 1% respectivamente, de la inversión de capital total.

**Tabla 1.10:** Factores Sugeridos de Costo Anual Para Sistemas de Antorchas

Artículo de costo	Factor
Costos directos anuales, <i>DC</i>	
Mano de obra{3}	
Operador	630 horas/año
Supervisor	15% del operador
Materiales de operación	-
Mantenimiento	
Mano de obra	½ hora por turno
Material	100% de la mano de obra de mantenimiento
Servicios	
Electricidad	Todos los servicios igual a:
Gas de eliminación	(Tasa de consumo) x
Gas de piloto	(Horas/año) x (costo de unidad)
Combustible auxiliar	
Vapor	
Costo indirecto anual, <i>IC</i>	
Gastos generales	60% de la mano de obra total y costos de mantenimiento
Gastos administrativos	2% de la inversión de capital total
Impuesto predial	1% de la inversión de capital total
Seguro	1% de la inversión de capital total
Recuperación de capital <sup>a</sup>	0.1315 x inversión de capital total
Costo total anual	Suma de los costos directos e indirectos anuales

<sup>a</sup>Véase el Capítulo 2.

## 1.6 Problema de Ejemplo

El problema de ejemplo descrito en ésta sección, muestra como aplicar los procedimientos de diseño del tamaño y de costo al control de una corriente venteada asociada a la destilación del metanol.

### 1.6.1 Información Requerida para el Diseño

El primer paso en el procedimiento de diseño es determinar las especificaciones del gas venteado que se va a procesar. La información mínima requerida de la corriente venteada para diseñar el tamaño de un sistema de antorcha para estimar su costo es:

- Razón de flujo masa o volumétrico
- Poder calorífico ó composición química
- Temperatura
- Presión del sistema
- Densidades del líquido y del vapor

Además, los siguientes datos son necesarios para calcular los costos directos anuales.

- Costos de mano de obra
- Costos del combustible
- Costos del vapor

En la Tabla 1.11 se enlistan los parámetros de la corriente venteada y los datos de costo a ser utilizados en éste ejemplo .

### 1.6.2 Capital del Equipo

El primer objetivo es determinar apropiadamente el tamaño del sistema de la antorcha auxiliado con vapor para destruir efectivamente 98% del COV (metanol), en la corriente venteada. Utilizando los parámetros y los procedimientos de diseño descritos en la Sección 1.3, se pueden determinar los diámetros y alturas de los cilindros de separación y de la antorcha. Una vez que el equipo ha sido especificado, se pueden determinar los costos de capital a partir de las ecuaciones presentadas en la Sección 1.4.1.

#### 1.6.2.1 Diseño del Equipo

El primer paso en el diseño del tamaño de la antorcha es determinar el diámetro apropiado de la boquilla de la antorcha. Conociendo el valor neto (el más bajo) del poder calorífico de la corriente venteada, puede calcularse la velocidad máxima permitida según los requerimientos del Registro Federal. Puesto que el poder calorífico varía de 300 a 1,000 *Btu/scf*, la velocidad máxima,  $V_{max}$ , se determina por la Ecuación 1.1.

**Tabla 1.11:** Datos del Problema de Ejemplo

Parámetros de la corriente venteada	
Razón de flujo	63.4 <i>acfm</i> <sup>a</sup> 399.3 <i>lb/hr</i>
Contenido calorífico	449 <i>Btu/scf</i> <sup>b</sup>
Presión del sistema	10 <i>psig</i> <sup>c</sup>
Temperatura	90 °F
Densidad del líquido[17]	49.60 <i>lb/ft</i> <sup>3d</sup>
Densidad del vapor[17]	0.08446 <i>lb/ft</i> <sup>3d</sup>
Datos de costo (Marzo 1990)[18,19]	
Horas de operación	8,760 horas/año
Gas natural	3.03 \$/1000 <i>scf</i>
Vapor	4.65 \$/1000 <i>lbs</i>
Mano de obra de operación	15.64 \$/hr
Mano de obra de mantenimiento	17.21 \$/hr

<sup>a</sup>Medida en la *boquilla de la flama*. La razón de flujo ha sido ajustada para compensar la caída de presión. de 10 *psig* en la fuente a 1 *psig* en la boquilla de la antorcha.

<sup>b</sup>Condiciones estándar: 77°F, 1 atmósfera.

<sup>c</sup>Presión en la fuente (punto de recolección de gas). La presión en la boquilla de la antorcha es menor: 1 *psig*.

<sup>d</sup>Medida a condiciones estándares.

$$\log_{10} V_{max} = \frac{449 \frac{\text{Btu}}{\text{scf}} + 1,214}{852} = 1.95$$

$$V_{max} = 89.5 \frac{\text{ft}}{\text{sec}}$$

Debido a que el poder calorífico de la corriente está por encima de 300 *Btu/scf*, no se requiere combustible auxiliar. Por lo tanto,  $Q_{tot}$  es igual a la razón de flujo de la corriente venteada. Basándose en  $Q_{tot}$  y  $V_{max}$ , el diámetro de la boquilla puede calcularse utilizando la Ecuación 1.5.

$$D_{min} = 1.95 \sqrt{\frac{63.4 \text{ scfm}}{89.5 \left(\frac{\text{ft}}{\text{sec}}\right)}} = 1.64 \text{ in}$$

**Tabla 1.12:** Costos de Capital Para Sistemas de Antorcha- Problema de Ejemplo

<b>Artículo de costo</b>	<b>Costo</b>
<b>Costos directos</b>	
Costos de equipo comprado	\$14,100
Sistema de antorcha (auto-sostenido)	820
Equipo auxiliar*	\$14,920
Suma = A	
Instrumentación	1,490
Impuestos sobre venta	450
Fletes	750
Costos de equipo comprado, <i>PEC</i>	<u>\$17,610</u>
<b>Costos directos de instalación</b>	
Cimientos y soportes	2,110
Manejo y edificación	7,040
Instalaciones el 130ctricas	180
Tubería	350
Aislante	180
Pintura	180
Costos directos de instalación	<u>\$10,040</u>
Preparación de sitio	
Instalaciones y edificios	
<b>Costos directos totales</b>	<u><b>\$27,650</b></u>
<b>Costos indirectos anuales, <i>DC</i></b>	
Ingeniería	1,760
Construcción y gastos de campo	1,760
Honorarios del contratista	1,760
Arranque	180
Prueba de funcionamiento	180
Contingencias	530
Costos indirectos totales, <i>IC</i>	<u>\$6,170</u>
<b>Inversión de capital total= <i>DC + IC</i></b>	<b>\$33,800</b>

<sup>a</sup> Se supone que es 6% del costo del sistema de antorcha. Para mayores informes sobre el costo del equipo auxiliar, refiérase a la Sección 2 de éste Manual.

El siguiente tamaño comercial estándar disponible de 2 pulgadas debe seleccionarse para  $D$ .

El próximo parámetro a determinar es la altura requerida de la chimenea de la antorcha. El calor liberado desde la antorcha se calcula utilizando la Ecuación 1.7.

$$R \frac{Btu}{hr} = W \frac{lb}{hr} B_v \frac{Btu}{lb}$$

Primero, el calor de combustión o poder calorífico debe convertirse de  $Btu/scf$  a  $Btu/lb$ . La densidad del vapor de la corriente venteada a temperatura y presión estándar es de  $0.08446 lb/scf$ .

Entonces,

$$B_v = \frac{449 \left( \frac{Btu}{scf} \right)}{0.08446 \left( \frac{lb}{scf} \right)} = 5316 \left( \frac{Btu}{lb} \right)$$

y,

$$R = \left( 399.3 \frac{lb}{hr} \right) \left( 5,316 \frac{Btu}{lb} \right) = 2,123,000 \frac{Btu}{hr}$$

Substituyendo  $R$  y los valores apropiados para las otras variables en la Ecuación 1.6:

$$L^2 = \frac{(1) (0.2) \left( 2,123,000 \frac{Btu}{hr} \right)}{4\pi \left( 500 \frac{Btu}{hr-ft^2} \right)} = 68 ft^2$$

Resultando en:

$$L = 8.2ft$$

Suponiendo que la antorcha más pequeña disponible comercialmente es de 30 pies, la altura será asignada a éste valor,  $L = 30 ft$ .

El siguiente paso es diseñar el tamaño del cilindro separador. Suponiendo un factor de diseño de la velocidad del vapor,  $G$ , de 0.20 y substituyendo las densidades del líquido y del vapor del metanol en la Ecuación 1.11, resulta en una velocidad máxima de:

$$U = 0.20 \sqrt{\frac{49.60 - 0.08446}{0.08446}} = 4.84 \frac{\text{ft}}{\text{sec}}$$

Dada la razón de flujo del gas venteado de 63.4 *scfm*, el diámetro mínimo transversal del recipiente se calcula por medio de Ecuación 1.12:

$$A = \frac{63.4 \text{ acfm}}{(60) \frac{\text{sec}}{\text{min}} (4.84) \frac{\text{ft}}{\text{sec}}} = 0.218 \text{ ft}^2$$

Esto resulta en un diámetro mínimo del recipiente de:

$$d_{\min} = 12 \frac{\text{in}}{\text{ft}} \sqrt{\frac{4}{\pi} (0.218 \text{ ft}^2)} = 6.3 \text{ in}$$

El diámetro seleccionado, *d*, redondeado al siguiente tamaño más grande a 6 pulgadas es 12 pulgadas. Utilizando la regla de la relación altura-diámetro de 3, resulta en una altura del recipiente de 36 pulgadas ó 3 pies.

#### 1.6.2.2 Costos de equipo

Una vez que el diámetro de la boquilla y la altura de la chimenea han sido determinados, pueden calcularse los costos de equipo. Puesto que la altura es de 30 pies, la antorcha será auto-sostenida. Los costos se determinan de la Ecuación 1.16.

$$\begin{aligned} C_F &= [78.0 + 9.14 (2 \text{ inches}) + 0.749 (30 \text{ ft})]^2 \\ &= \$14,100 \end{aligned}$$

Los costos del cilindro separador se determinan utilizando la Ecuación 1.21, donde *t* está determinado por el rango de valores presentado en la Sección 1.3.7. Substituyendo 0.25 por *t*:

$$C_K = 14.2 [ (12) (0.25) (36 + 0.812 (12)) ]^{0.737} = \$530$$

Los costos de la tubería de transferencia se determinan utilizando la Ecuación 1.19.

$$C_p = 127 (2)^{1.21} = \$290$$

El costo total del equipo auxiliar es la suma de los costos del cilindro separador y de los costos de la tubería de transferencia, ó:  $\$530 + \$290 = \$820$ .

La inversión de capital total se calcula utilizando los factores dados en la Tabla 1.19. En la Tabla 1.12 se muestran los cálculos. Por lo tanto:

$$PEC = 1.18 \times (14,920) = \$17,610$$

y:

$$TCI = 1.92 \times (17,610) = \$33,800$$

### 1.6.3 Requerimientos de la Operación

La mano de obra de operación se estima en 630 horas anuales con mano de obra de supervisión de 15% de ésta cantidad. La mano de obra de mantenimiento se estima en 1/2 hora por turno. Los costos de los materiales de mantenimiento se suponen iguales a los costos de la mano de obra de mantenimiento.

Tal como se establece en la Tabla 1.11, puesto que el contenido calorífico de la corriente de ejemplo es mayor a  $300 \text{ Btu/scf}$ , no se necesita un combustible auxiliar. Sin embargo, se requiere del gas natural para la purga y para el gas del piloto. Los requerimientos se calculan de la Ecuación 1.8.

$$F_{pu} = 6.88 (2 \text{ in})^2 = 27.5 \frac{\text{Mscf}}{\text{yr}}$$

Puesto que el diámetro de la boquilla es menor a 10 pulgadas, los requerimientos de gas del piloto se basan en un solo quemador piloto (véase la Sección 1.3.5) y se calculan por medio de la Ecuación 1.9.

$$F_{pu} = 6.88 (2 \text{ in})^2 = 27.5 \frac{\text{Mscf}}{\text{yr}}$$

Cuando  $N = 1$ ,

$$F_{pi} = 613 (1) = 613 \frac{\text{Mscf}}{\text{yr}}$$

Los requerimientos de vapor se calculan de la Ecuación 1.10. Insertando la razón de flujo masa del metanol de 399.3 lb/hr, resulta:

$$S = \left( 0.4 \frac{lb \text{ steam}}{lb \text{ flare gas}} \right) \left( 8760 \frac{hr}{yr} \right) \left( 399.3 \frac{lb}{hr} \right) = 1,400 \frac{lb}{hr}$$

#### 1.6.4 Costos Totales Anuales

La suma de los costos indirectos e indirectos anuales resulta en un costo anual de \$61,800. En la Tabla 1.13 se muestran los cálculos de los costos directos e indirectos anuales del sistema de antorcha, calculados de los factores en la Tabla 1.10. Los costos directos incluyen mano de obra, materiales y servicios. Los costos indirectos son los costos fijos asignados al proyecto, incluyendo los costos de recuperación de capital y otros costos tales como los gastos generales, seguros, impuestos y gastos administrativos.

Los costos de un sistema de manejo de gas (ventilador, soplador, compresor), tendrían que incluirse si la presión de la corriente venteada no fuera suficiente para vencer la caída de presión del sistema. En el caso de éste ejemplo, se supone que la presión es adecuada.

**Tabla 1.13:** Problema de Ejemplo de Costos Anuales para Sistemas de Antorcha

Concepto de costo	Cálculos	Costo
Costos directos anuales, <i>DC</i>		
Mano de obra de operación		
Operador	630 h x \$15.64 año h	\$ 9,850
Supervisor	15% del operador = 0.15 x 9,850	1,480
Materiales de operación		
Mantenimiento		
Mano de obra	0.5 h x turno x 8,760h x \$17.21 turno 8 h año h	9,420
Materiales de mantenimiento	100% de la mano de obra de mantenimiento	9,420
Servicios		
Electricidad		
Gas de purga, insertando la razón flujo masa de metanol de 399.3 lb/hr:	27.5 Mscf x \$3.03 año Mscf	80
Gas de piloto	613 Mscf x \$3.03 año Mscf	1,860
Vapor	1,400 x 10 <sup>3</sup> lb x \$4.65 año 10 <sup>3</sup> lb	6,510
<i>DC</i> total (redondeado)		\$38,600
Costos indirectos anuales, <i>IC</i>		
Generales	60% del total de materiales y mano de obra = 0.6(9,850 + 1,480 + 9,420 + 9,420)	18,100
Gastos administrativos	2% de la inversión de capital total= 0.02 (\$33,800)	680
Impuestos Prediales	1% de la inversión de capital total= 0.01 (\$33,800)	340
Seguros	1% de la inversión de capital total =0.01 (\$33,800)	340
Recuperación de capital <sup>a</sup>	0.1098 x \$33,800	3,710
<i>IC</i> total (redondeado)		23,200
Costo total anual (redondeado)		\$61,800

<sup>a</sup> El factor de recuperación de capital, *CRF*, es una función de la vida del equipo de la antorcha y el costo de oportunidad del capital (v.g. tasa de interés). Por ejemplo, para una vida de 15 años y un interés de 7%, *CRF* =0.1098

## 1.7 Reconocimientos

Los autores reconocen agradecidamente a las siguientes compañías por contribuir con datos a éste capítulo:

- Flaregas Corporation (Spring Valley, NY)
- John Zink Company (Tulsa, OK)
- Kaldair Incorporated (Houston, TX)
- NAO Incorporated (Philadelphia, PA)
- Peabody Engineering Corporation (Stamford, CT)
- Piedmont HUB, Incorporated (Raleigh, NC)

## Referencias

- [1] *Guide for Pressure-Relieving and Depressurizing Systems*, Refining Department, API Recommended Practice 521, Second Edition, September 1982.
- [2] Kalcevic, V. (IT Envirosience), "Control Device Evaluation Flares and the Use of Emissions as Fuels", *Organic Chemical Manufacturing Volume 4; Combustion Control Devices*, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, Publication no. EPA-450/3-80-026, December 1980, Report 4.
- [3] *Reactor Processes in Synthetic Organic Chemical Manufacturing Industry-Background Information for Proposed Standards*, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC, Preliminary Draft, EPA 450/3-90-016a, June 1990.
- [4] Carta de J. Keith McCartney (John Zink Co., Tulsa, OK) a William M. Vatavuk (U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC), Noviembre 19, 1990.
- [5] Carta de David Shore (Flaregas Corp., Spring Valley, NY) a William M. Vatavuk (U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC), Octubre 3, 1990.
- [6] Carta de Pete Tkatschenko (NAO, Inc., Philadelphia, PA) a Diana Stone (Radian, Research Triangle Park, NC), Mayo 2, 1990.

- [7] Carta de Gary Tyler (Kaldair, Inc., Houston, TX) a Diana Stone (Radian, Research Triangle Park, NC), Abril 10, 1990.
- [8] Carta de Zahir Bozai (Peabody Engineering Corp., Stamford, CT) a Diana Stone (Radian, Research Triangle Park, NC), Mayo 7, 1990.
- [9] Carta de James Parker (John Zink Co., Tulsa, OK) a Diana Stone (Radian, Research Triangle Park, NC), Abril 17, 1990.
- [10] Carta de Nick Sanderson (Flaregas Corp., Spring Valley, NY) a Diana Stone (Radian, Research Triangle Park, NC), Mayo 2, 1990.
- [11] Wu, F.H., "Drum Separator Design, A New Approach," *Chemical Engineering*, April 2, 1984, pp. 74-81.
- [12] Mulet, A., "Estimate Costs of Pressure Vessels Via Correlations," *Chemical Engineering*, October 5, 1981, pp. 145-150.
- [13] *Process Plant Construction Estimating Standards*, Richardson Engineering Services, Inc., Volume 4, 1988 Edition.
- [14] Peters, Max S. and Klaus D. Timmerhaus, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, Third Edition, McGraw-Hill, 1980.
- [15] Información de costos de Piedmont HUB, Incorporated, Raleigh, NC. Agosto de 1990.
- [16] Vatavuk, W.M., and R. Neveril, "Estimating Costs of Air Pollution Control Systems, Part II: Factors for Estimating Capital and Operating Costs,," *Chemical Engineering*, November 3, 1980, pp. 157-162.
- [17] *Handbook of Chemistry and Physics*, 55th Edition, CRC Press, 1974-1975.
- [18] Green, G.P. and Epstein, R.K., *Employment and Earnings*, Department of Labor, Bureau of Labor Statistics, Volume 37, No.4, April 1990.
- [19] *Monthly Energy Review*, Energy Information Administration, Office of Energy Markets and End Use, U.S. Department of Energy, DOE-EIA-0035(90/12), February 1990.

## TECHNICAL REPORT DATA

*(Please read Instructions on reverse before completing)*

1. REPORT NO. <b>452/B-02-002</b>	2.	3. RECIPIENT'S ACCESSION NO.
4. TITLE AND SUBTITLE  <b>Manual de Costos de Control de Contaminacion del Aire de la EPA</b>	5. REPORT DATE <b>July, 2002</b>	
	6. PERFORMING ORGANIZATION CODE	
7. AUTHOR(S) <b>Daniel Charles Mussatti</b>	8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO.	
9. PERFORMING ORGANIZATION NAME AND ADDRESS <b>U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Air Quality Standards and Strategies Division Innovative Strategies and Economics Group Research Triangle Park, NC 27711</b>	10. PROGRAM ELEMENT NO.	
	11. CONTRACT/GRANT NO.	
12. SPONSORING AGENCY NAME AND ADDRESS  <b>Director Office of Air Quality Planning and Standards Office of Air and Radiation U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC 27711</b>	13. TYPE OF REPORT AND PERIOD COVERED <b>Final</b>	
	14. SPONSORING AGENCY CODE <b>EPA/200/04</b>	
15. SUPPLEMENTARY NOTES <b>Updates and revises EPA 453/b-96-001, OAQPS Control Cost Manual, fifth edition (in English only)</b>		
16. ABSTRACT <b>In Spanish, this document provides a detailed methodology for the proper sizing and costing of numerous air pollution control devices for planning and permitting purposes. Includes costing for volatile organic compounds (VOCs); particulate matter (PM); oxides of nitrogen (NOx); SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, and other acid gases; and hazardous air pollutants (HAPs).</b>		
17. KEY WORDS AND DOCUMENT ANALYSIS		
a. DESCRIPTORS	b. IDENTIFIERS/OPEN ENDED TERMS	c. COSATI Field/Group
<b>Economics Cost Engineering cost Sizing Estimation Design</b>	<b>Air Pollution control Incinerators Absorbers Adsorbers Filters Condensers Electrostatic Precipitators Scrubbers</b>	
18. DISTRIBUTION STATEMENT  <b>Release Unlimited</b>	19. SECURITY CLASS ( <i>Report</i> ) <b>Unclassified</b>	21. NO. OF PAGES <b>1,400</b>
	20. SECURITY CLASS ( <i>Page</i> ) <b>Unclassified</b>	22. PRICE